

64/104

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES AGRONOMIQUES DU NIGER

I.N.R.A.N.

LE MILIEU PHYSIQUE, LE CLIMAT ET L'APTITUDE
A L'IRRIGATION DES SOLS DES PERIMETRES IRRIGUES
DE SONA ET DE LOSSA
(TERRASSE DU NIGER)

-Monographie-

Serge VALET

HYDRO-PEDOLOGUE

Mai 1981

IRAT
3 MAI 1985
DOCUMENTATION
MONTPELLIER

D G R S T

Délégation à la Recherche
Scientifique et Technique

35 rue St Dominique
75700 PARIS

G E R D A T

Groupeement d'Etudes et de
Recherches pour le Développe-
ment de l'Agronomie Tropicale

42 rue Scheffer
75016 PARIS

I - INTRODUCTION

Le Niger de par sa position géographique, subit un étagement de climats du Sud au Nord dont la caractéristique principale est la diminution de la saison pluvieuse, et en durée et en abondance.

La région de Lossa, où le gouvernement a créé un périmètre irrigué sur les terrasses du fleuve Niger, se situe dans une zone de type soudano-sahélienne, qui ne reçoit en moyenne que 500 mm de pluie.

L'alternance d'une courte saison humide, au cours de laquelle se concentrent toutes les précipitations, et d'une longue saison sèche, va imposer le type d'agriculture, donc l'alimentation et les revenus d'une population principalement agricole et, ainsi, rythmer la vie sociale, culturelle et économique. Le développement économique du Niger ne peut s'accomplir qu'avec l'assurance d'une production agricole supérieure et constante, par l'augmentation de la saison utile à l'agriculture. Pour cela, il faut faire sauter le goulet d'étranglement qui apparaît être principalement l'alimentation hydrique des cultures ; alimentation de complément en saison des pluies pour palier les trous à déficit pluviométrique, alimentation totale en saison sèche pour réussir des cultures très diversifiées de contre saison et complémentaires. C'est dans cet esprit que le Gouvernement du Niger a réalisé cet aménagement hydro-agricole des terrasses du Niger. Car l'attention, depuis 1970, s'est déplacée vers les problèmes de développement agricoles qui avait été négligé antérieurement le plus souvent au profit de l'industrialisation ou de lutte contre la pauvreté.

L'élément fondamental de la lutte contre la pauvreté et la famine passe par l'accroissement de la productivité agricole.

L'Etat a pris conscience que ce développement doit l'obliger à dispenser des aides non commerciales à l'agriculture : système d'irrigation, éducation, promotion d'Institut de Recherches Agricoles et contrôle des conditions écologiques.

La révolution verte est saluée comme un progrès important de l'agriculture du Tiers Monde. Cet aménagement permettra ainsi, par l'artificialisation du climat grâce à l'irrigation, de :

- couvrir les besoins en eau des cultures par des irrigations de complément en saison des pluies pour :

- . éviter les trous à déficits pluviométriques,
- . cultiver des plantes à cycle long et à meilleur rendement,
- . utiliser un matériel végétal plus adapté répondant mieux aux irrigations.

- assurer la totalité des besoins en eau en saison sèche pour un ensemble de cultures très diversifiées et intéressantes sur le plan nutritionnel et économique.

II - OBJECTIF

L'objectif de la recherche hydro-pédologique conduite au cours de cette prospection, sur les sols des terrasses du Niger à Lossa était de définir et préciser la connaissance des divers paramètres, liés aux principaux sols dans le contexte pédo-climatique de cette zone ; paramètres indispensables à l'irrigation pour permettre l'élaboration du projet d'aménagement hydro-agricole et l'exploitation plus rationnelle, donc plus économique, des sols et de l'eau disponible du périmètre à aménager.

Contrairement aux études préliminaires antérieures, où "les projets de mise en valeur fondés sur des aménagements hydro-agricoles sont élaborés puis mis en place en l'absence de toute étude des conditions caractérisant sur le plan hydro-pédologique les périmètres considérés" (GILLET, 1970), celle-ci permet l'obtention de résultats in situ orientant les décisions d'aménagement de ce périmètre.

Par rapport à la simple observation des profils et les mesures de laboratoire sur échantillons remaniés, ces résultats in situ assureront une connaissance bien plus précise :

- de tous les paramètres nécessaires pour déterminer le ou les types d'aménagement hydro-agricole à mettre en place à LOSSA,
- des modes de mise en valeur et des techniques d'exploitation en fonction des ressources en eau pour chaque type de sol retenu et pour chaque plante conseillée.

Ils permettront ainsi, dans le cadre d'une unité-expérimentale - cultures irriguées, de grouper toutes les connaissances exigées pour le choix rationnel des modes et techniques qui seront ainsi testés et serviront de modèles transposables aux futurs périmètres (100.000 ha) qui seront créés plus au Nord, vers TILLABERY après la construction du barrage de KANDADJI.

En résumé :

- assurer et intensifier la production d'hivernage et permettre le plein emploi et une production supplémentaire et complémentaire de saison sèche. Cette double intensification peut seule réaliser le passage d'une agriculture traditionnelle à une agriculture dynamique et moderne.

Ce type d'agriculture intensive dont le développement est impérieux permettra de résoudre les problèmes de sous-nutrition et de mal nutrition en zone tropicale, trop souvent sujette depuis 1968 aux aléas climatiques.

III - METHODOLOGIE ET MATERIEL

1 - Méthode de terrain

La méthode mise en oeuvre consiste à recueillir sur des aires échantillons caractéristiques des principaux types de sols, le maximum de données qui permettent de chiffrer leurs paramètres hydriques et hydrodynamiques, ainsi que les facteurs limitants.

On suit un protocole simple, reproductible comprenant les opérations successives suivantes :

. Choix de l'aire échantillon

Guidé par les documents pédologiques préexistants et une reconnaissance rapide, le pédologue chargé de l'étude localise dans un type de sol donné un site de faible surface le plus représentatif possible.

Une fosse pédologique complétée par des sondages à la tarière permet de s'assurer de la validité du choix.

. Mise en place d'un tubage d'accès pour sonde à neutrons

Le tube en aluminium (AG 5, diamètre 41-45 mm) est enfoncé jusqu'à 2 m de profondeur en moyenne dans un trou creusé à la tarière.

Les échantillons de sols, extraits du forage par prélèvements tous les 10 cm, sont destinés à l'analyse pour l'humidité pondérale, les courbes pF et la texture.

Un profil neutronique est relevé dans ce sol initialement sec.

. Description de profil

Selon les normes de l'ORSTOM et de la SOGETHA, avec les précisions fournies par le glossaire de pédologie (Association Informatique et Biosphère) - couleur déterminée avec le Munsell Color Chart.

. Densité apparente

Elle est déterminée à l'aide d'un gammadensimètre de type DR 18 sur 18 cm par tranche de 20 cm de la surface jusqu'à 2 mètres de profondeur au droit du tube. Il est composé d'un bâti se plaçant à la surface du sol contenant deux compteurs Geiger-Muller 4G 14C et un préamplificateur relié à une échelle de comptage de type ECP 511.

Une source de 3 millicuries de Cesium 137, située en bout d'une tige métallique est enfoncée de 18cm dans la terre. On mesure un flux gamma d'autant plus atténué que la densité du sol est élevée. Un jeu de filtres métalliques élimine les rayonnements gamma de faible énergie, donc l'influence des effets photo-électriques. La courbe d'étalonnage unique pour tous les sols donne des résultats à la précision du pour cent. Cet appareil, très précis, est d'un emploi courant en travaux publics. 3 mesures sont faites à 120° à chaque profondeur.

. Profil d'humidité pondérale

Prélèvement à l'aide d'une tarière d'échantillons non remaniés, transportés en boîtes métalliques ou en verres étanches et séchés à l'étuve (24 heures) à 105° C.

. Profils neutroniques

Mesurés dans des tubes en duralumin, enfoncés verticalement dans le sol jusqu'à 2 mètres maximum, à l'aide de 2 types d'humidimètres à neutrons.

. Humidimètre type CEA-BERTIN (sonde nemo 10)

fabriqué en pré-série,

cet appareil se compose de 3 parties :

* Une sonde proprement dite comportant une source Be de 150mG, un compteur 3 NE T à BF 3 et un amplificateur, une THT (1 800 volts environ).

* module mécanique avec un treuil sur lequel s'enroule un câble de 10 m, une plaquette d'alimentation externe et une protection biologique.

* Module électronique avec un tableau de commande pour programmer les paramètres de fonctionnement (notamment le nombre de mesures par profil, leurs positionnements dans le tubage, le temps de comptage, le nombre de cycles...) ; les résultats de mesures sont enregistrés sur une bande magnétique (minicassettes). Un ensemble interface de lecture et imprimante traduit en clair les données enregistrées sur bande.

. Humidimètre classique type LEPAUTE (décrit dans la littérature)

. Mise en place du dispositif d'apport d'eau

Le dispositif est le suivant :

- 2 anneaux, un en tôle formant un bassin central de 0,25 m² entouré d'un anneau en acier inox de garde de 1 m² (principe Muntz).

Après l'implantation du tube, l'ensemble de l'aire est replané et biné sur 5/8 cm pour effacer tout tassement et replacer l'ensemble des sites dans des conditions identiques. Pour les mises en eau suivantes aucun travail de sol n'est réalisé.

Le bassin central a été recouvert de film plastique, plaque de polystyrène ou d'une planche (1 m² sur laquelle reposait la sonde automatique, pour éviter l'évaporation du sol nu). dans ce type de bassin, un seul tube est mis en place permettant l'utilisation de la sonde automatique. Une quantité d'eau, peu importante et relativement aisée à apporter, est nécessaire pour obtenir la saturation apparente sur 2 mètres (600 à 900 mm).

. Mise en eau

Ces quantités d'eau sont apportées en plusieurs fois à des intervalles de temps et en plusieurs mises en eau de 200 à 50 mm espacées de quelques heures à quelques jours, sur sol sec à la première mise en eau et sur sol saturé ou ressuyé ensuite. On maintient une submersion de 5 cm minimum dans les bassins sauf lorsque l'approvisionnement est plus long que l'infiltration.

On procède régulièrement aux mesures des vitesses d'infiltration ainsi qu'aux relevés des profils neutroniques suivant une cadence rapide (de plusieurs minutes à l'heure) en début de cinétique.

. Etude de la phase ressuyage

Dès la fin de l'infiltration, le sol est recouvert d'un mulch (polystyrène expansé de 5 cm) pour supprimer l'évaporation. La fréquence des relevés neutroniques décroît avec le temps pour tendre vers un rythme journalier et hebdomadaire.

. Analyse détaillée de l'emplacement du tube d'accès

Dans une fosse creusée au droit du tube, on effectue, outre les mesures de densité, les mesures d'humidité pondérale, les prélèvements de sols pour analyse de caractéristiques neutroniques. On fournit également une description pédologique détaillée qui tient compte du contexte géomorphologique du site.

. Dépouillement des données neutroniques

Les bandes magnétiques traduites en bandes perforées ont été dépouillées sur l'ordinateur IBM 360/65 du CEN CADARACHE avec introduction dans le programme de calcul des valeurs de la densité suivant les profondeurs ainsi que les coefficients des courbes d'étalonnage.

Les résultats sont fournis sous forme de listings ou de graphiques sur traceuse électromécanique BENSON 1341.

- Mesures neutroniques et profils neutroniques,
- valeurs des humidités volumiques et profils hydriques,
- stock d'eau par tranches de sol aux dates des relevés
- évolution des stocks d'eau en fonction du temps,
- profils des écarts hydriques à la capacité de rétention.

2 - Analyses de laboratoire

. analyse granulométrique (1)

Méthode dite internationale : attaque à l'eau oxygénée de la matière organique et dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium.

- Fractions inférieures à 2 mm :

Argiles < 2 microns,
limons de 2 à 20 microns,
sables très fins 20 à 50 microns,
Sables fins et grossiers 20 à 2000 microns,

- Refus à 2 mm.

. Humidités aux différents pF (1)

Les échantillons séchés à l'air sont tamisés à 2 mm puis soumis à une humectation "par ascensum" et ils subissent un ressuyage forcé à pF 4.2 ou 16 atmosphères (Presse à membrane) et aux pF 3, 2.8, 2.5 ou 2.2 (appareil à plaque poreuse).

. Densité réelle (1)

Cette dernière a été réalisée au picnomètre.

. Courbe d'étalonnage (2)

La réponse d'un humidimètre à neutrons, pour une géométrie de mesure donnée, dépend de l'humidité, de la densité apparente sèche et de la composition chimique totale du sol par l'intermédiaire de ses paramètres neutroniques. La courbe d'étalonnage est spécifique de chaque sol et même des horizons pédologiques, et varie avec leur densité apparente.

2 méthodes d'étalonnage ont été utilisées :

. Etalonnage expérimental sur un sol en place on mesure corrélativement en phases sèches (avant irrigation) et humide, l'humidité pondérale, la densité réelle et le comptage neutronique. Cette méthode est approximative et ne peut être retenue que pour utiliser rapidement ces données (pilotage d'une irrigation). On procède à des ajustements lors des irrigations.

La courbe $N = (\alpha \rho s + \beta) H v + \gamma \beta s + \delta$ ($N = 1000$ I/sec dans l'eau) est assimilée à une droite linéaire.

$\alpha \beta \delta$	constantes chimiques du sol,
$H V$	humidité volumique,
$P 1$	densité apparente du sol.

. Etalonnage par flux neutronique un flux neutronique subit une absorption et diffusion selon les constantes pédologiques du milieu environnement. Cette méthode permet de mesurer deux autres constantes a (absorption liée au sol) et d (diffusion liée à l'eau de constitution).

Cette méthode consiste donc à mesurer expérimentalement les constantes d'absorption et diffusion des neutrons des sols. Elle a l'avantage d'être rapide et peu onéreuse. Elle évite les erreurs dues à l'analyse chimique des sols ou à l'étalonnage comparatif gravimétrique.

- NOTA : (1) Les analyses ont été réalisées au laboratoire des sols de l'IRAT-NOGENT.
- (2) Les courbes d'étalonnage ont été réalisées d'après les analyses faites au service de la Recherche Agronomiques du C.E.A. CADARACHE, ainsi que le dépouillement informatique des enregistrements neutroniques.

Date d'étude localisation

Cette étude a été réalisée à partir de deux prospections de début décembre 1975 jusqu'au 15 février 1976 à LOSSA et SONA et en Mai 1977 à SONA.

Elle englobe la mise en place de 20 tubages d'accès (5 à LOSSA et 15 à SONA), les mesures à l'humidimètre à neutrons, les prélèvements, les mesures de densité apparente.

Les deux périmètres sont situés au Nord à 75 km de Niamey sur la route de Tillabéry :

. LOSSA comprenant 100 ha à droite de la route avant le village de LOSSA.

. SONA comprenant 90 ha à gauche de la route à 5 km après le village de LOSSA.

Le Climat

Le cycle des saisons reflète la marche annuelle du soleil, avec deux passages au zénith très rapprochés au 15 mai et au 28 Juillet, vers le 14ème parallèle, accompagné d'une augmentation des précipitations qui se produit environ six semaines après ce dernier passage.

La culmination des pluies d'été se situe donc vers la mi-Août.

Cette zone est caractérisée par un climat de type tropical :

Arid (THORNTHWAITE - 1948),
Sahélo-saharien (AUBREVILLE - 1949) ou
Sahélien Sud (RODIER - 1964).

à une saison des pluies courte et une saison sèche longue.

Ces deux grandes saisons sont séparées par des périodes de transition très courtes (CHAROY 1971 - DAVIES 1971).

Les températures

Les températures de cette zone apparaissent comme excessives. La moyenne thermique annuelle atteint 29°C avec comme maxi moyen 36.5 et mini moyen 21.9.

Ces valeurs moyennes passent, au cours de l'année, par deux maxima et deux minima :

maxi : 33.6 en Mai,
30.2 en Octobre,
mini : 25.0 en Janvier,
27.3 en Août,

Il en est de même des valeurs moyennes maxi et mini, qui atteignent dans leur extrême 41.6°C (Avril) et 16.4°C (Janvier).

Les amplitudes moyennes mensuelles décroissent pour passer par un minimum de $8,9^{\circ}\text{C}$ en Août. 7 mois de l'année, cette amplitude est supérieure à l'amplitude moyenne annuelle. Ceci caractérise bien le domaine intertropical (PEGUY 1961).

Ce sont ces variations cycliques annuelles qui entraîne l'apparition de ces saisons intermédiaires :

- saison sèche froide : novembre à février,
- saison sèche chaude : mars à mi-juin,
- saison des pluies moins chaude à fraîche
mi-juin à mi-septembre,
- saison des pluies moyennement chaude,
mi-septembre à octobre.

La répartition du nombre de jours froids et chauds souligne bien les deux saisons suffisamment tranchées pour permettre les cultures de climat tempérées de Novembre à début mars et celles de climat tropical d'Avril à Octobre. Les variations d'une année sur l'autre sont faibles. (tableau 1 bis).

TABLEAU 1

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Températures moyennes (1930 - 1975)	25.0	27.5	30.6	33.1	33.6	31.8	28.9	27.3	28.8	30.2	28.4	25.2	29.2
Températures maxi. (1930 - 1975)	33.6	36.2	39.3	41.6	40.6	37.9	34.0	31.8	34.3	38.0	37.6	33.6	36.5
Température mini. (1930 - 1975)	16.4	18.8	22.0	24.6	26.7	25.7	23.8	22.9	23.4	22.4	19.3	16.8	21.9
Amplitudes moyennes (1930 - 1975)	17.2	17.4	17.3	17.0	13.9	12.2	10.2	8.9	10.9	15.6	18.3	16.8	14.6
Insolation (en heures) (1930 - 1975)	297	264	266	243	269	263	264	253	258	283	283	280	3.267
Hygrométrie (en %) (1930 - 1975)	37	31	33	44	57	77	82	88	81	73	41	42	
Pluviométrie (mm) (1930 - 1975)	-	-	-	2.9	21.4	55.9	123.6	188.6	73.3	11.5	-	-	460.2
Evaporation bac cl.A (1930 - 1975)	210	223	305	316	280	245	217	195	198	220	204	192	2805
Evaporation potentielle (mm) (PENMAN)			200	212	224	199	171	157	160	170			

TABLEAU 1 bis : REPARTITION DU NOMBRE DE JOURS FROIDS ET

CHAUDS

	Température °C						
	Nombre de jours maxi			Mini			Indice Climo
	> 45	40-45	35-40	20-25	15-20	< 15	(1)GRAMMIQUE
Janvier	0	0	5	0	15	16	A
Février	0	1	14	6	18	4	A
Mars	0	13	15	17	11	1	A
Avril	0	23	6	10	1	0	A
Mai	0	22	9	5	0	0	A
Juin	0	10	16	10	1	0	Tm
Juillet	0	1	15	19	2	0	Tm
Août	0	0	10	25	3	0	Th
Septembre	0	1	15	24	2	0	Tm
Octobre	0	2	27	20	8	0	A
Novembre	0	0	14	7	20	2	A
Décembre	0	0	10	2	21	0	A

Nota : (1) mois à caractéristiques aride : A

mois à caractéristiques tropical : T

m : modéré

h : humide

L'insolation est très élevée et varie assez peu au cours de l'année. Elle diminue toutefois légèrement en Avril par suite de l'apparition de brume sèche et en Août à cause des nuages.

Les variations d'une année sur l'autre sont faibles en saison sèche (1) (KOWAL et KNABE - 1972) et peut atteindre 14 % de Mars à Octobre (2). (tableau 1, G1).

Etat hygrométrique de l'air

- Humidité relative

Les variations saisonnières sont importantes, avec un seul minimum en Février (31 %) et un seul maximum en Août (88 %) Seuls six mois ont une humidité supérieure à 50 %. Cette courbe de l'humidité suit celle de la pluviométrie, dont elle dépend. Elle est toutefois légèrement plus étalée, par suite de la modification du régime des vents à partir d'Avril et de l'effet résiduel de la saison des pluies en Novembre. (tableau 17 G1).

- Pouvoir évaporant de l'air

Il est particulièrement élevé. Il présente un maximum et un minimum absolus en Mars et Août et un maximum et un minimum relatifs peu accusés en Novembre et Janvier.

Les valeurs obtenues à partir de l'évaporation d'un bac d'eau libre, type classe A sont très élevées et atteignent 2800 mm par an. Ces valeurs pondérées par un coefficient de culture, dépendant de la culture et de son stade de croissance, permettent d'estimer les besoins maximum en eau de ces cultures. (DANCETTE - DUC - ETM = K en bac A.

(RIDDER 1970 - KALMS - VALET 1975 - RYSKJ, 1974 - CHAROY 1971 - DUC 1976 - RIOU DUBOIS 1966). (Tableau 1 G1).

(1) vent sec du N-E entraînant des ciels clairs.

(2) Irrégularité de la couverture nuageuse.

IRAT NIGER
STATION DE TILLABERY
PERIODE 1965-1971

Tableau 2 : ANALYSE FREQUENTIELLE DU VENT A 10 METRES

Direction du vent moyenne inter-annuelle.

Mois	Total	NOMBRE D'HEURES OU LA DIRECTION DU VENT EST DE CLASSE															
		1		2		3		4		5		6		7		8	
		H	%	H	%	H	%	H	%	H	%	H	%	H	%	H	%
1	3707	1629	44	1225	33	155	4	37	1	133	4	78	2	263	7	187	5
2	3384	1008	30	1206	36	293	9	113	3	153	4	101	3	201	6	309	9
3	3720	840	23	1171	31	160	4	103	3	360	10	123	3	473	13	490	13
4	3345	392	12	437	13	141	4	310	10	546	16	340	10	546	16	633	19
5	3720	108	3	178	5	80	2	753	20	1076	29	889	24	443	12	193	5
6	3600	75	2	71	2	32	1	669	19	1493	41	745	21	373	10	142	4
7	3720	35	1	73	2	35	1	558	15	1776	48	884	24	273	7	86	2
8	3720	67	2	157	4	32	1	503	13	1590	43	1009	27	254	7	108	3
9	3600	77	2	166	5	74	2	657	18	1222	34	646	18	598	17	160	4
10	3720	298	8	470	13	440	12	606	16	845	23	462	12	378	10	221	6
11	3600	709	22	1385	39	402	11	259	7	213	6	80	2	104	3	368	10
12	3720	817	22	1439	39	196	5	149	4	211	6	113	3	449	12	346	9
Année	43556	6135	14	7978	18	2040	5	4717	11	9618	22	5470	13	4355	10	3243	7

IRAT/NIGER
STATION DE TILLABERY
Années 1965 à 1972

(1969 manque)

Tableau 3 : ANALYSE FREQUENTIELLE DU VENT

A 10 METRES

Vitesse du vent (fiche récapitulative)

Mois	Nb. d'années de mesures	Nb. d'h. mesurées	Nombre d'heures où le vent est de gamme									
			a		b		c		d		e	
			H	%	H	%	H	%	H	%	H	%
1	6	4451	244	5	2198	49	1635	37	348	8	26	1
2	6	4080	212	5	1842	45	1485	37	503	12	38	1
3	7	5208	430	8	2629	50	1556	30	499	10	94	2
4	7	4800	473	10	2784	58	1163	24	309	6	71	2
5	7	5208	397	8	2958	57	1370	26	379	7	104	2
6	7	5040	317	6	2786	55	1483	30	332	7	122	2
7	6	4464	160	4	2494	56	1486	33	235	5	89	2
8	6	4464	434	10	2884	64	969	22	133	3	44	1
9	6	4320	517	12	3004	69	699	16	74	2	26	1
10	6	4464	909	20	2887	65	606	14	60	1	2	0
11	6	4320	937	22	2303	53	962	22	118	3	0	0
12	6	4456	407	9	2655	60	1175	26	212	5	7	0
Total	-	55275	5437	10	31424	57	14589	26	3202	6	623	1

Les vents

Cette région est soumise au cours de l'année à l'alternance de deux régimes de vent :

- en saison sèche, le vent dominant est l'"harmattan", vent continental sec et dessèchant qui souffle du nord après avoir traversé des étendues désertiques N à N-E ;
- en saison des pluies, les vents maritimes de "mousson" parviennent après avoir traversé les régions équatoriales humides du S et S.O.

Les changements de régime sont soulignés par une grande variabilité directionnelle des vents (avril et Octobre) tableau 2 (graphe 2) - (IRAT 1972, GAVAUD 1977 - DAVIES 1977).

La vitesse du vent est très variable non seulement au cours de l'année mais aussi au cours de la journée. (tableau 3).

Les vents ont une force assez faible, bien plus faible en saison des pluies qu'en saison sèche à l'exception de renforcement sporadique du vent en période transitoire formant les tornades sèches, propices à l'érosion éolienne.

Au cours de la journée, les vents forts (3 à 10 m/s) se lèvent brutalement vers 9 h, toute l'année, pour décroître à partir de 13/14 et tomber vers 18 h. (graphe 3).

Pendant la nuit les vents ne dépassent jamais 5 m/s à l'exception des mois de transition affectés par les tornades.

La fréquence des vents les plus puissants s'observe en saison sèche alors que la végétation est réduite.

Il apparaît ainsi que les vents les plus forts soufflent pendant les périodes les plus chaudes de l'année (Février à Juin) et aux heures les plus ensoleillées (9 à 18 h) accroissant la demande évaporative et provoquant ainsi un fort dessèchement du sol.

Ces dernières années la sécheresse s'est manifestée par un changement du régime éolien entraînant :

- . Une augmentation des vents de type "harmattan"
- . Une diminution des vents de type "mousson" (MAINGUET et alt 1977).

La pluie

La saison des pluies est liée au balancement de la zone de convergence Intertropicale (ZCIT), presque parallèle à l'équateur et qui suit avec retard de six semaines la marche annuelle du soleil.

C'est la pluie qui va être l'élément climatique dominant dans la production végétale et agricole, dans l'évolution pédogénétique des sols et dans le façonnement des paysages.

La pluie moyenne annuelle, enregistrée au cours des 65 années (1930-1977) atteint 483.5 mm tombés pendant une période courte de 3 mois 1/2 environ qui rend ainsi l'équilibre entre les précipitations et l'exigence hydrique des plantes très précaires. Equilibre encore compromis par la très forte demande évaporative. (tableau1, G1)

C'est la répartition de cette pluie bien plus que sa hauteur annuelle et mensuelle qui est nécessaire à la croissance des plantes.

De tous les éléments composant le climat c'est celui qui subit la plus grande variabilité d'une année à l'autre, au cours d'une même année, d'une semaine à l'autre et surtout d'un lieu à l'autre. Les grosses averses couvrent en général des surfaces de 5 km sur 20 km, dans le sens du vent-(DAVIES, 1977).

Pour de courtes périodes, comme la décade, ou un faible nombre d'années, la médiane doit être adoptée à la place de la "normale" ou moyenne car plus significative, (FRANKLIN, 1969 - OMM, 1977). La médiane annuelle sur 65 ans qui représentera 98 % de la norme en est donc très voisine et sûre.

Pour beaucoup de problèmes pratiques de planification (urbanisme, industrie, agricole) la connaissance, à une probabilité connue, de l'apparition d'un événement pluviométrique est des plus intéressantes.

La probabilité de 20 % de risque (une année sur cinq) qu'une quantité de hauteur de pluie ne soit pas atteinte soit une probabilité de 80 % d'être dépassée est acceptable et peut donc être retenue. (TOURTE 1978 - DAVIES 1977 - FRANKLIN 1969 - LOBERT - DAUTY 1969 - FOREST 1974 - DANCETTE 1977). (tableau 4).

Il résulte de ces analyses que la région de Tillabéry montre une très grande variabilité pluviométrique décadaire, mensuelle et annuelle qui entraîne la précarité des récoltes.

Caractéristiques climatiques

La combinaison des caractères thermiques et pluviométriques principalement à l'aide de formules proposées par de nombreux chercheurs (géographes, pédologues, agronomes et bioclimatologues), permet de définir et classer climatiquement chaque région. Les principaux indices moyens pour Tillabéry (de Martonne, Emberger, Aubert-Hénin) montrent bien le caractère accusé de forte aridité de cette zone.

Mais ils rendent mal compte de la réalité car ils utilisent des valeurs annuelles et mensuelles. Or, comme il a été vu au paragraphe pluie, la plupart des données pluviométriques réelles s'écartent énormément des normales et médianes (tableau 5).

Ils ne peuvent servir que pour une classification climatique, écologique, botanique et hydrologique générale.

Bilan hydrique

Le bilan hydrique d'une région, d'un bassin nécessite la détermination par calcul (formules empiriques climatiques, KIJNE-BAARS 1971 - KOWAL 1972, LACOSTE 1963) de l'évapotranspiration potentielle - (évapotranspiromètre, bac, Piche).

Les nombreuses formules proposées (TURC - COUTAGNE - THORNTHWAITE 1948 - MAKINK - BLANEY et CRIDDLE 1950 - BOUCHET 1964 - PENMAN 1956) s'avèrent souvent décevantes hors de leur aire climatique d'origine comme cela a été remarqué (DANCETTE 1971 - SCHOCH 1967 - CHAROY 1971 - FRANQUIN 1969 - GRAS - OSTY 1965 - GORCIE - LOPES).

TABLEAU 4 : REPARTITION FREQUENTIELLE PLUVIOMETRIQUE

DECADAIRE (mm)

Mois	Décades	50 %	75 %	80 %	Mini	Maxi
Mai	1	0.0	0.0	0.0	0.0	13.5
	2	0.0	0.0	0.0	0.0	30.5
	3	4.0	0.0	0.0	0.0	63.2
Juin	1	8.7	3.1	2.2	0.0	136.0
	2	11.8	4.5	3.3	0.0	59.3
	3	19.8	10.1	8.4	1.4	62.3
Juillet	1	21.3	11.1	9.2	0.0	96.2
	2	27.2	13.4	11.0	1.2	98.2
	3	34.4	17.8	14.8	0.4	168.8
Aout	1	48.9	31.1	27.5	9.8	148.9
	2	65.3	41.1	36.4	3.6	307.6
	3	57.5	35.6	31.2	11.9	204.5
Septembre	1	39.1	22.1	18.8	0.0	158.5
	2	24.2	13.5	11.4	0.0	69.3
	3	14.1	5.1	3.6	0.0	70.2
Octobre	1				0.0	28.5
					0.0	35.7
					0.0	25.6

Mini. Médiane Maxi

275

473

861

Beaucoup de chercheurs préfèrent utiliser la formule de PENMAN (COCHEME - FRANQUIN 1967 - MC CULLOCH 1965 - HANSEN 1975 - RIOU 1967, DANCETTE 1977 - FOREST 1974 - DAVIES 1977). qui intègre un grand nombre de données climatiques (température pression de vapeur, vitesse du vent, insolation, rayonnement...).

Sa valeur annuelle est très élevée mais moins que celle des besoins en eau d'un bac classe A qui est couramment employée pour le calcul. Elle varie bimodalement au cours de l'année comme la température. Elle fait apparaître les périodes à forte déficits hydriques. (tableau 1).

Les fortes valeurs que l'on devrait observer en été sont fortement atténuées par :

- la remontée de la ZCIT à cette latitude en Août avec :
recul de l'harmattan sec et brulant -
avance de la mousson humide et nuageuse.

C'est pourquoi, comme pour la température, on observe ainsi :

. 2 maxi :	- avril	avec	316 mm
	- octobre	"	220 mm
. 2 mini :	- décembre	"	192 mm
	- août	"	195 mm

L'ETP a une faible variation d'une année à l'autre. Cette variation reste comprise entre + 8 % et - 5 % pour 20 stations années étudiées (RIOU 1975). Mais en début de saison des pluies (périodes intermédiaires instables) l'ETP décadaire accuse une plus grande variabilité (RIOU - DAVIES).

Les résultats moyens mensuels et annuels soulignent bien les conditions de très grande aridité de cette zone, la très forte demande évaporative, le manque de drainage et la reconstitution limitée des réserves en eau du sol.

Ruissellement - Infiltration et réserves en eau des sols :

Le bilan hydrique déterminé ci-dessus doit être corrigé en introduisant les facteurs sols et géomorphologiques.

Le calcul du bilan hydrique moyen mensuel ne laisse apparaître qu'une lente et tardive reconstitution des réserves et aucun drainage.

En fait ce bilan doit être corrigé par des études "in situ" qui tiennent compte des caractéristiques physiques des sols et de la géomorphologie ainsi que des caractéristiques des pluies (hauteur, intensités, fréquence et succession dans le temps).

Il apparaît ainsi qu'il existe un ruissellement et selon les années un drainage dont l'importance dépend évidemment de l'importance des pluies.

De nombreux auteurs (RODIER 1975 - CTFT 1975 - CHARREAU - SEGUY 1969 - ROOSE 1975 - VALET 1978) ont mesuré l'écoulement en parcelle et en bassins versants de différentes tailles (2 à 10.000 km²).

Ils ont pu ainsi calculer le coefficient de ruissellement. Ce dernier varie avec l'intensité de la pluie, la hauteur d'eau, l'humectation du sol, la fréquence, la place dans la saison, la nature du sol, la plante et l'état structural du sol.

sur sols sableux il varie de 3 à 12 %,

sur sols bruns sablo-argileux de 5 à 15 % (ORSTOM 1964)

sur sols ferrugineux tropicaux de 3 à 27 %

sur sols bruns argileux vertiques de 20 à 41 %

Des mesures effectuées en cuves d'érosion ont donné pour un sol sableux à Niamey 2.2 à 2.4 % pour 390 et 478 mm (CTFT) (pente de 3 %) et sur sol sablo-argileux à SEFA (pente de 1 à 2 %) 12 % mais sous une pluviométrie plus forte (729 mm) (CHARREAU et SEGUY 1969).

A Tillabéry sur une toposéquence, après une pluie cumulée de 57 mm, et après une pluie de 43,4 mm on enregistrait des ruissellements de 6 à 47 % (tableau 6).

Ces chiffres confirment bien ceux obtenus en bassin comme en parcelle d'érosion pour des sols texturalement et génétiquement voisins (VALET 1978).

La variation annuelle du ruissellement est assez faible pour les sols peu à pas perméables mais considérables pour les sols assez à très perméables (RODIER 1975).

Le ruissellement annuel varie cependant toujours plus largement que la pluie car il est dépendant d'un plus grand nombre de facteurs.

Tableau 6 : TILLABERY - RUISSELLEMENT SUR TOPOSEQUENCE APRES

UNE PLUIE DE 43.4 mm (12.07.77)

SOLS	LIEUX	Pente %	Ruissellement	
			mm	%
I. Sol dunaire	Sommet dune	2	3	6
II. " "	Mi-pente	4	7	15
III. Sol argileux	Bas de pente	1.5	20	46
IV. Sol brun subaride	Replat	1	12	27

LE NIGER

Le Niger est un des fleuves les plus grands, longs et puissants qui traverse la zone sahélienne. Il confère à la région de Tillabéry et Lossa non seulement son originalité géomorphologique mais aussi socio-économique.

Il prend sa source en région humide, remonte vers le Nord-Est puis redescend vers le Sud.

Ce fleuve a un régime pérenne, quoiqu'une partie des eaux est perdue dans les zones plus arides par évaporation et une autre par infiltration dans les grandes dépressions qu'il inonde chaque année.

Ses variations saisonnières forment une courbe unimodale assymétrique avec un maximum en février, et un minimum en juillet (G4).

La décrue est plus rapide que la montée des eaux. Les débits moyens enregistrés lors des étiages (55) en Juillet en absence de tout ouvrage pour régulariser le fleuve ou stocker l'eau ne permettent en fait que d'assurer l'irrigation d'une faible superficie.

Pour une demande d'irrigation complémentaire de 60 mm par semaine avec une durée d'irrigation de 24 heures pendant 6 jours ouvrables seuls 19.800 ha pourraient être irrigués.

Le niger va jouer un rôle non négligeable, modérateur de l'évapotranspiration potentielle, et ainsi modifier assez considérablement le climat (CIEH août 1972). De novembre jusqu'en février il apparaît une zone à ETP minim sur l'ensemble de la cuvette fluviale avec un effet maximum en décembre qui correspond à la pointe de la crue donc à l'étalement maximal des eaux. Cette réduction pour la région de Lossa atteint 10 % environ. Les conséquences devraient donc apparaître sur la pédogénèse et sur la végétation.

Lors de la sécheresse, des étiages absolus de 2.6 m³/s en 1973 et de 0.6 m³/s en 1974 ont été enregistrés, soit une recurrence de 50 à 100 ans (SIRCOULON 1972). Ils représentaient un déficit de 91 et 98 %. Mais c'est aussi au niveau des crues dont la baisse entraîne une diminution des terres inondées qui permettent les cultures de décrue, le riz flottant et les fourrages (BOURGOU) que la sécheresse a joué.

Le Niger n'a pas atteint son profil d'équilibre ; sa pente moyenne varie entre 3 et 27 cm/km. Avant Tillabéry elle est de 27 et entre Tillabéry et Lossa elle s'abaisse à 16 cm/km, car le fleuve coule sur des roches dures. On peut remarquer toutefois des biefs calmes.

Nota : Le module 1973-1974 n'a atteint que 600 m³/s représentant
---- un déficit de 39 %, soit une recurrence proche de
50 ans (SIRCOULON 1972).

SECHERESSE

Il n'est pas possible de clore le chapitre consacré au climat sans mentionner la sécheresse qui a sévit dans la zone soudano-sahélienne et sahélienne entre 1968 et 1977.

La sécheresse se définit comme un phénomène de déficit anormal d'eau et se distingue donc de l'aridité.

Elle s'est manifestée à Tillabéry par une baisse pluviométrique importante qui a entraîné :

. Un fléchissement de 5 % de la moyenne annuelle de la pluviosité sur 65 ans.

. Une baisse de 25 % de celle au cours de la dernière décade par rapport à la moyenne des 30 dernières années (tableau 7-G5).

CAUSES

Diverses hypothèses ont été avancées pour expliquer cette dernière phase décadaire sèche, succédant à deux phases décadaires excédentaires. :

1. Le changement de climat coïncide avec un refroidissement de la calotte glaciaire qui est en expansion. La pression atmosphérique est en augmentation de 2 mm bar depuis 10 ans avec l'expansion de l'air froid qui repousse les ceintures climatiques et déplace l'équateur vers le Sud de 2 à 300 km. Les masses d'air équatoriales ne remontent plus vers la zone sahélienne. Il n'y aurait pas de changement climatique en vue (CILSS 1974).

2. L'activité des taches solaires a fortement diminué ces dernières années entraînant une baisse pluviométrique, mais selon leur cycle, cette activité devrait reprendre en 1979 (CILSS.WOOD 1974).

TABLEAU 7 : EFFET DE LA SECHERESSE SUR LA PLUVIOMETRIE

A TILLABERY

TILLABERY 14° 12' N	Moyenne 1923-65 53 ans	Moyenne 1923-77 65 ans	Moyenne 1948-77 30 ans	Moyenne des décades		
				1948-57	1958-67	1968-77
Moyenne annuelle mm	507	483.5	456.2	489.2	517.7	361.8
Ecart relatif %	100	- 5	100	+ 7	+ 14	- 20
Ecart relatif %	-	100	- 5.7	+ 1.2	+ 7.8	- 25.2

3. Le déboisement serait également une cause de la désertification par modification plus ou moins irréversible de l'environnement. Car le seuil critique pour la régénération naturelle et spontanée serait dans de nombreuses zones dépassées et tout espoir de reconquête vain (DEPIERRE - GILLET 1973- DELWAULLE 1975).

4. Ces périodes successives de déficit pluviométriques pourraient éventuellement être le résultat du hasard et l'accumulation d'erreurs de mesures (DAVIES 1977). Ceci est toutefois peu probable (DAVIES 1977).

5. La persistance de la sécheresse pourrait découler de la rétro-action d'événements antérieurs.

La première année de sécheresse a entraîné une raréfaction et/ou disparition de la végétation d'où une plus grande réflexion de l'énergie calorifique par un sol dénudé. La conséquence est une diminution des pluies dans le futur avec accentuation de son effet sur la végétation (CHARLEY 1975).

6. Cette période serait cyclique et de l'ordre de 10 à 30 ans. Des relations ont montré qu'à toute baisse de température moyenne en Europe correspondaient des augmentations pluviométriques. Cette phase de sécheresse serait de brève durée (CILSS 1974-PB WRIGHT 1974).

7. Les "oscillations méridionales" thermiques des océans entraînent des variations de pression avec augmentation des précipitations quand la température des masses d'eau augmente et ralentissement pour des baisses de température.

Les hauteurs de pluies des régimes sahéliens semblent corrélées avec l'indice d'oscillation méridionale avec une marge d'erreur de 8 % (PB WRIGHT 1974).

Les différentes théories apparaissent fort contradictoires sur la persistance de cette sécheresse et aucune malheureusement ne permet d'établir de prédiction climatique sûre.

CONSEQUENCES

L'observation des relevés pluviométriques depuis 1930 fait apparaître des périodes successivement "sèches" et "humides" mais de durée différente et de fréquences variables. La période 1968-77 se distingue par une baisse pluviométrique très importante, de l'ordre de 25 % par rapport à la moyenne (361 sur 483 mm).

Cette sécheresse apparaît comme la plus sévère et la plus longue que les relevés pluviométriques peuvent montrer.

Elle ne s'est pas manifestée par des retards dans les premières pluies mais surtout par une diminution du nombre de jours de pluies et une baisse pluviométrique en Aout et Septembre et un arrêt souvent plus brutal de la saison des pluies (NOUDEU 1977 - VALET 1978 - DAVIES 1975 - SECK 1970).

Les conséquences sont catastrophiques quoiqu'incalculables sur tous les plans, sociaux démographiques, écologiques et économiques. Elles ont obligé à une aide immédiate mais surtout nécessite la mise en place d'une stratégie globale de lutte à moyen et long terme qui devrait s'opérer à tous les niveaux :

- zone sahélienne,
- Etat,
- Province,
- champ de paysan.

et à tous les domaines dramatiquement touchés et/ou nécessaires à l'élaboration de cette stratégie.

(SIRCOULON 1972 - VALET 1978 - DE MIRANDA 1977 - IRAT 1974 - SECK 1970 - DROUHIN 1973).

GEOLOGIE ET GEOMORPHOLOGIE

1 - La Géologie

Bien que le climat soit certes l'un des facteurs principaux qui conditionnent le devenir agro-pédologique d'une région, la géologie est l'un des facteurs essentiel car elle influence le relief, la circulation de l'eau et la répartition géochimique des éléments dans le paysage.

Cette zone de Lossa - Sona s'étend en une vaste pénéplaine tectoniquement inactive maintenant (CIEH 1972), de 200-300 m d'altitude, dominée par des collines tabulaires à recouvrement latéritique.

Tout le soubassement est formé par le socle précambrien moyen ou vieux bouclier africain (PRUVOST 1958):

Formations Birrimiennes métamorphiques du Liptako et granites éburnéens qui leurs sont associés (Graigert et Pouquet), ainsi que divers granites "concordants", "orientés" et discordante de natures pétrographiques très variés (Machens 1967 - Barrère 1965).

La région constitue un bassin géosynclinal de cette série du Liptako de direction NE-SW. Elle a été plissée au cours d'une phase orogénique contemporaine de la mise en place des granites syntectoniques. La tectonique cassante observée est postérieure.

Ensuite à partir du Jurassique d'épaisses couches sédimentaires se déposent formant les "continental de base" "Intercalaire et terminal". (C. KILIAN 1931). Ces séries ont été affectées par différents cycles d'érosion :

- cycle Gondwanien au Jurassique,
- Cycle post-gondwanien au Crétacé,
- Cycle Africain I (début tertiaire),
- Cycle Africain II (fin tertiaire).

Ces cycles d'érosion ont été accélérés par des soulèvements d'ordre épeirogénique des dépôts des Continental (GREIGERT 1967).

Ces érosions successives ont favorisé surtout pour la rive Ouest du Niger le décapage presque total d'alluvions alors qu'en rive Est ils ont été moins affectés. Le fleuve coule en grande partie sur le bed-rock sain.

L'érosion a été limitée par la présence de deux niveaux de cuirasse, moyenne vers 400 m, tabulaire à corniche franche et de bas niveau, en aval et nourrit par la première (J. KILIAN 1976).

Ensuite se sont succédées des périodes arides avec constitution d'ergs (morts et vivants) sur pente et envahissement des vallées à partir d'érosion et creusement des caniveaux (BOCQUIER - GAVAUD 1964) et périodes humides avec formation du réseau hydrographique.

Actuellement la tendance à l'aridisation du climat a pour conséquence la remise en route des ensembles sableux et la fossilisation des rivières par leur ensablement (Didier de ST Amand 1964).

2 - Le modelé

Le modelé est la résultante du bilan morphogénèse - pédogénèse qui a constamment évolué avec les variations climatiques qui se sont succédées dans cette région (J. Kilian - 1974, J. TRICART 1974).

Les zones étudiées sont situées entre le fleuve Niger qui les borde à l'Ouest et le glacis (moyen) concave qui se raccorde par le glacis versant, convexe, au haut glacis cuirassé, formant les massifs tabulaires qui les dominent à 400 - 450 m. Ces glacis sont cloisonnés perpendiculairement au fleuve par des bombements rocheux (F. Feau 1976).

Le bas glacis se raccorde aux niveaux de bases successifs (GAVAUD 1977). Il se distingue des glacis plus anciens par l'absence d'une cuirasse ferrugineuse continue et par la faible épaisseur de formations meubles masquant le substratum rocheux (P. MICHEL 1967).

Ce modelé peut, au premier coup d'oeil, apparaître comme très monotone, plat et mou, très faiblement ondulé comme celui de Haute-Volta (S. GUILLOBEZ 1979).

Mais à l'observation on y rencontre également un ensemble "d'accidents" qui constitue le paysage spécifique de ces zones géoclimatiques :

- bourrelet de berge entre la terrasse exondée et les alluvions actuelles (S. GUILLOBEZ 1979 - J. KILIAN 1976).
- inselberg ou chicots rocheux nus, sains et durs pointants.
- incisions linéaires vives (S. GUILLOBEZ 1976).
- vallons en berceau non fixés.
- cuvettes endoréïques.
- dune (erg ancien) rubéfiée entamé par les cours d'eau et erg plus récent brunifié (GAVAUD 1977).
- nappe de graviers et granules latéritiques sous revêtement sableux éolien (P. MICHEL 1973 - GAVAUD 1977 - FEAU 1976).

Les glacis actuels de dénudation et colluviaux forment la surface fonctionnelle caractérisée par son modelé plat à faible dénivellation (BOULET 1974). Le façonnement de ces glacis au cours des périodes sèches (VOGT 1969) se poursuit actuellement car il n'est pas protégé par un niveau cuirassé (P. MICHEL 1973 - J. KILIAN 1976). L'érosion l'emporte sur l'altération (BÜDEL 1952) et a évolué progressivement de linéaire à aréale puis en nappe d'épandage.

Le périmètre de Lossa est situé en grande partie sur le bas glacis de dénudation et constitué principalement d'un matériau d'altération peu profond reposant sur la migmatite (1) alors que le périmètre de Sona en bordure du fleuve et séparé de lui par un bourrelet de berge est essentiellement constitué d'alluvions du Niger.

L'altitude du périmètre de Lossa s'étage régulièrement de 195 m à 200 m du S. au N. ; celle de Sona de 192 à 195 m.

(1) Dans sa partie Sud, toutefois, on rencontre des alluvions d'un kori et celles du Niger.

La chronologie suivante, qui repose sur des travaux de divers auteurs (PIRARD F. au Tchad 1966, GRAVAUD au Niger 1977 et ELOUARD, MICHEL-FAURE 1968 au Sénégal) a été proposée par J. TRICART :

1° Période sèche	Mise en place de l'erg ancien - dunes orientées WSW-ENE	Pré-Ouljien
<u>Période humide</u>	Mise en place de la haute terrasse et pédogénèse sur les dunes (sols rouges - ferruginisation)	Ouljien
2° Période aride	Mise en place de l'erg récent (dune jaune - sol peu évolué)	Pré-Flandrien (Ogolien)
<u>Période humide</u>	Trace d'un rivage lacustre un peu plus élevé que la cote maxima actuelle (1,5 à 2 m). Edification des levées alluviales. Bancs de sable.	Néolithique

(IN BLANCK 1968)

=====

3 - Morphogénèse actuelle

Actuellement l'aridisation qui se manifeste s'accompagne donc d'une double érosion qui affecte les formations peu épaisses de cette zone :

- érosion éolienne qui s'intensifie et joue sur les formations sableuses qui sont reprises et remises en mouvement - nouvelle redistribution dans le paysage. Cette érosion est soulignée par la présence d'entonnoirs de déflation, de rides et de dépôts dans les koris, les dépressions et les cuvettes endoréïques. (F. FEAU 1976 - GUILLOBEZ 1979).

- érosion hydrique encore efficace par ruissellement, aréolaire, diffus, pelliculaire avec l'augmentation de l'intensité pluviométrique, de la durée de la pluie et de la pente augmentant la turbulence jusqu'à former une nappe qui favorise l'épandage de sable, graviers peu roulés, anguleux et cailloux (quartz, gravillons ferrugineux, nodules ferromanganifère, débris cuirasses) mais qui ne sont pas en voie de recimentation.

Le ruissellement principal qui intègre tous les processus, en un même lieu selon l'intensité, provoque aussi sur les surfaces des sols un décapage et un glaçage entraînant leur compaction.

La concentration du ruissellement, localement, conduit à une érosion par griffure et ravinement vers les koris où l'on observe des surcreusements, des dépôts et des débordements.

A Sona c'est le premier type d'érosion qui prédomine, le milieu étant assez stable. A Lossa par contre le ruissellement l'emporte surtout dans la partie sud où s'observent les formes les plus accusées de ravinement près du kori. Cette zone de glaciis est plus particulièrement instable.

L'érosion aura également un effet d'autant plus marqué et catastrophique que l'aridisation s'accuse et qu'ainsi le couvert végétal déjà bien "maigre" se raréfie, comme avec tout aménagement hydro-agricole qui ne sera pas mis en place avec une installation anti-érosive sérieuse et donc efficace.

Les sols

Les facteurs de la pédogénèse sont multiples, certains dynamiques (climat) d'autres statiques (roche-mère), subissant les influences des premiers ; et ils vont donner à cette région des caractères pédogénétiques particuliers.

La roche-mère sur ces périmètres est homogène et constituée des migmatiques du Liptako, formations calco-alcalines. Les sédiments alluviaux et les formations colluviales sont hérités également de cette roche, mais remaniement, topographie et climat ancien ont favorisé le triage non seulement granuleux mais aussi chimique constituant des substratums plus variés.

Les deux périmètres se distinguent par une texture spécifique des substratums originels des sols. C'est ainsi qu'à Sona la texture est bien plus hétérogène qu'à Lossa car situé à une altitude plus basse et aussi plus proche du fleuve les matériaux constitutifs des roches sont à dominance d'origine alluviale. A Lossa par contre le remaniement sur place d'un matériau hérité des migmatites a maintenu une meilleure homogénéité texturale quoique très localement et en surface oblitéré par des sables éoliens ou comme aussi sur une profondeur plus grande par des matériaux d'origine alluviale un peu plus lourds. C'est ainsi que la texture à Lossa reste comprise entre les limites : de sableuse/sable limoneux à limono-argilo-sableuse, alors qu'à Sona elle s'échelonne de sableuse à argile fine. Cette texture reste toujours plus légère (plus sableuse) en surface, soit par recouvrement sableux soit par départ sous ruissellement des éléments fins (Diagrammes des textures).

L'observation des profils montre que les sols dans leur ensemble présentent une origine polygénétique par suite de troncature, recouvrement, érosion, solifluxion, alluvionnement successifs dans le passé souligné par des successions d'épipédons à couleur, à texture et/ou structure différente (cf. coupes 1 et 2)(FEAU 1976).

C'est ainsi par ses caractères pétrochimiques que la roche mère va intervenir dans la formation des sols et dans les caractères primaires ou secondaires qui peuvent les marquer et les différencier. Riches en bases alcalines les sols vont être imprégnés en Mg et Na libérés par altération de la roche-mère ou du substratum et ce en abondance avec ou non concentration locale faisant parler d'une "salure du paysage" (GAVAUD 1979). C'est ce qui est figuré sur une carte, résultat d'une étude de détail plus fine de M. C. EISMA (1979) faisant apparaître des zones de salure élevée à Lossa, se répartissant en taches plus ou moins étirées dans le sens de la pente générale (cf carte n° 1) mais il n'existe malheureusement pas de critères morphologiques discriminants qui permettent de reconnaître de façon sûre la présence de cette concentration sodique.

La réserve en bases calco-alcaline (Ca, Mg, K et Na) libérées dans le profil à partir des minéraux de la roche-mère assure une alimentation minérale aux plantes et confère une excellente richesse agronomique à ces sols.

Ce n'est certes pas seulement le climat actuel qui imprime ses effets sur les épipédons mais aussi tous les climats anciens qui se sont succédés avant même le pré-ouljien à maintenant et qui peuvent expliquer les héritages pédogénétiques inscrits dans les profils.

C'est donc à des paléoclimats plus humides qu'une pédogénèse plus active peut être attribuée et à qui l'on doit des épipédons très altérés et très marqués sur une grande profondeur sur ces deux périmètres qui ont été implantés entre les grands ensembles dunaires. On peut parler de phénomènes climatiques polycycliques qui ont imprimé des caractères suffisamment différenciés sur les matériaux déjà polygénétiques pour constituer des horizons nettement tranchés (FEAU 1976 - GAVAUD 1977).

On observe ainsi des horizons épais blanchis et des horizons à taches, bariolés de type pseudogley bien plus épais et mieux répartis à Sona qu'à Lossa où, la plus faible épaisseur en général des matériaux et une pente plus régulière élimine la stagnation hydrique sauf localement dans des dépressions ou des cuvettes.

C'est aussi des phases climatiques plus humides qui ont donné naissance à d'épaisses altérites siallitiques à dominance kaolinique. Le résultat est la formation d'épipédons ferrugineux peu lessivés dont le climat correspond à des précipitations de l'ordre de 700 à 750 mm minimum.

Le changement climatique ne peut les affecter et ces caractères hérités, imprimés aux épipédons restent invariant s'ils sont situés en profondeur, sur une roche imperméable et en situation peu drainante, dans le paysage ou en latitude plus élevée (GAVAUD 1977).

Les conditions thermiques élevées et qui s'accroissent avec l'aridisation créent une situation de sécheresse édaphique et ambiante peu favorable au développement végétal d'une part et à la conservation dans les sols de la matière organique d'autre part qui subit une très forte minéralisation. Ces sols se caractériseront donc par une très faible teneur en matière organique.

Le climat actuel a une faible activité dans la pédogénèse. Les actions combinées des fortes températures et des faibles pluviométries quoique concentrées sur quelques mois favorisent la désagrégation des migmatites et l'altération des minéraux. Mais quoique cette région présente un lessivage potentiel due à cette concentration estivale (AUDRY 1967) celui-ci n'affecte qu'une faible épaisseur de sol.

"L'équilibre entre lixiviation et libération des bases au Niger est déplacé en faveur de cette dernière du sud au nord avec le ralentissement de la pluviométrie", d'où formation de faciès subaride avec maintien d'un pH neutre et d'un complexe absorbant bien pourvu en bases échangeables. (GAVAUD 1968).

Donc dans cette zone située entre 400 et 700 mm les horizons climatiques actuels présentent des caractères brun à brun rouge subarides en surface.

L'altération dominante de type bisiallitique par voie basique favorise la néoformation de séquence à smectite le plus souvent alcalisée (feldspaths calco-alcalins) par suite de non lixiviation des solutions du sol (hydrolysats calco-alcalin et siliceux) (DUCHAUFOR 1970 - GAVAUD 1977 - GUILLOBEZ 1979). Des variations dans la topographie et/ou de texture entraînant des concentrations locales de sel sodique par confinement des solutions du sol. Ces concentrations pourraient être dues en certains cas à des variations pétrochimiques de la roche-mère. La distribution de ce sel dans le paysage n'a jusqu'ici fait l'objet d'aucune étude ni approfondie ni systématique.

L'activité pédogénétique des températures élevées et des précipitations concentrées et le modelé conduisent à la formation de sols zonaux comme intrazonaux.

Les sols zonaux sont les sols bruns et brun-rouge subarides et les sols intrazonaux qui constituent un climax stationnel (DUCHAUFOR 1970) appartiennent aux classes des vertisols, sols hydromorphes, sols halomorphes et sols peu évolués d'apport éolien.

Toutefois le paysage pédologique, par suite des variations dans l'espace des constituants et de leurs acquis pédologiques imprimés dans le temps ainsi que d'un modelé variable conduisant à des ensembles d'unités de paysage largement imbriquées sur de faibles distances.

Ces associations s'opèrent au sein de toposéquences qui se succèdent des glacis aux terrasses.

Les textures et les régimes hydriques sont topographiquement liés. Les variations de drainage progressives des glacis aux terrasses impriment "des caractères hydromorphes qui se surimposent le plus souvent à la morphologie de sols bien drainés" (GAVAUD 1977).

L'intensité de l'hydromorphie s'accroît donc des parties hautes du glacis aux parties basses des terrasses induisant ses caractères spécifiques.

KALOGA 1966 souligne que "vertisols, sols bruns eutrophes et sols halomorphes associés forment un complexe de sols à génèse assez voisine ne se différenciant que par des caractères secondaires.

C'est pourquoi les associations de sols vont varier du glacis inférieur (MS) de Lossa aux terrasses moyennes et basses de Sona; presque exclusivement zonaux à Lossa ils forment à Sona des ensembles intrazonaux importants.

A LOSSA : Sol brun subaride et/ou calcique.

Sol brun subaride à pseudogley profond.

Sol brun subaride hydromorphe (drainage réduit).

Sol brun subaride à faciès halomorphe.

Sol peu évolué d'apport éolien.

A SONA : Sol brun-rouge subaride.

Sol peu évolué d'apport éolien.

Sol hydromorphe minéraux à pseudogley.

Sol hydromorphe minéraux à pseudogley et faciès vertique.

Sol hydromorphe minéraux à gley de nappe.

Sol hydromorphe minéraux à amphigley.

Vertisols.

Dans chacun des périmètres un certain nombre de sites à étudier a été retenu et choisi en fonction d'un large éventail de situation pédologique :

. 15 sur le périmètre de Sona plus hétérogène.

. 5 à Lossa (Tableau 8).

TABLEAU 8 : CARACTERISATION DES SITES ETUDIES

Perimètres	N° Sites étudiés	Symbole	Unité de paysages	Matériau	Modelé	Typologie des sols	Pédogénèse	Morphogénèse
SONA	800	1	Recouvrement éolien	Sable éolisé	Pente faible	Sol peu évolué d'apport éolien rouge	Steppisation	Légère reprise éolienne
	801	7	Cuvette	Argile sodée	Plan	Sol hydromorphe à pseudogley alcalisé	Hydromorphie	
	802	2	Bourrelet sableux	Sable argileux	Pentes faibles	Sol brun-rouge	Steppisation	Ruissellement diffus
	803	8	Cuvette	Argile lourde	Plan	Vertisol (sodé)	Vertique	
	804	4	Bourrelet sableux à nappe	Sable alluvial fin	Pente très faible	Sol hydromorphe à gley de nappe	Hydromorphie	Termitière
	810	7	Cuvette	Argile sodée	Pente faible	Sol hydromorphe à pseudogley alcalisé	Hydromorphie	
	811	3	Bourrelet sableux	Sable argileux	Pente très faible	Sol brun-rouge	Steppisation	Ruissellement diffus
	812	2	id	Sable alluvial	Pente faible	Sol brun-rouge	Steppisation	Ruissellement diffus faible
	813	2	id	id	id	id	id	id
	814	2	id	id	id	id	id	id
	815	5	Bourrelet sableux à nappe	Sable alluvial	Pente très faible	Sols hydromorphes minéraux à gley	Hydromorphie	Termitière
	816	10	Cuvette	Argile	Plan	Sols hydromorphes à amphigley	Hydromorphie	
	817	6	Cuvette	Argile sableuse à argile	Plan	Sol hydromorphe minéraux à pseudogley	Hydromorphie	
	818	6	id				id	
	819	6	id				id	

TABLEAU 8 : CARACTERISATION DES SITES ETUDIES (suite)

Péri- tres	N ° Sites étudiés	Sym- bole	Unité de paysages	Matériau	Modelé	Typologie des sols	Pédogenèse	Morphogenèse
<u>LOSSA</u>	805	4	Migmatites altérées	Sable argi- leux à ar- gile sa- bleuse	Pentes très fai- bles	Sol brun subaride à pseudogley profond	Steppisa- tion et hy- drom. pro- fonde	Ruissellement diffus
	806	3	"			" "		
	807	10	Cuvette dé- gradée	id	id	Sol brun subaride hy- dromorphe	id	id
	808	1	Recouvrement sableux	Sable éo- lisé rouge	Légère éléva- tion	Sol peu évolué d'ap- port éolien rouge	Steppisa- tion	Reprise éolien- ne
	809	2	id	Sable éo- lisé jaune	à pentes faibles	Sol peu évolué d'ap- port éolien jaune	id	id

(In FEAU) NOTA : Les 800 à 809 correspondent à la première prospection et 810 à 819 à la seconde.

SONA offre un milieu plus stable que LOSSA.

RESULTATS

1 - Texture

La texture, compte tenu de l'origine des matériaux, varie non seulement avec la profondeur mais localement, et ce bien plus fortement à SONA qu'à LOSSA où les matériaux sont surtout autochtones et moins influencés par le fait alluvial. (Diagrammes des textures).

Malgré un faible échantillonnage, limité à 20, on peut observer une répartition fréquentielle texturale qui souligne bien ce fait. Le tableau 9 montre :

- un regroupement des textures de LOSSA qui se concentrent de plus en plus de la surface à 1 mètre de profondeur. De sableuse à limoneuse très sableuse en surface la texture passe à limoneuse très sableuse à limono-argilo-sableuse. Ceci souligne la forte influence des altérites de la migmatite peu remaniée ;

- les textures de surface sont le plus souvent plus "légères", plus sableuses ; 35 % des sols ont une texture de surface sableuse à sablo-limoneuse, 30 % ont encore une texture limoneuse très sableuse.

Ce criblage granulométrique ne s'explique pas par le lessivage des éléments fins, car le matériau sous-jacent est peu poreux, (GAVAUD 1977) mais par un micro-alluvionnement du à l'érosion hydrique, ruissellement, qui concentre de façon relative les sables ou par l'érosion éolienne qui apporte par transit local les sables et les concentre de façon absolue.

Avec l'aridisation le départ des éléments fins et le déplacement des sables et leur concentration en surface, ne peut que s'accroître.

TABLEAU 9 : CLASSEMENT TEXTURAL DES SOLS ETUDIES

Texture	En surface		Jusqu'à 50 cm		60 cm à 100 cm	
	Sites	En %	Sites	En %	Sites	En %
Sableuse	800 • ⁽³⁾ <u>805-806-808</u> ⁽¹⁾	(2) 20	800	5	800	5
Sablo-limoneuse	802- <u>809</u> -812	15	804 • • ⁽³⁾ <u>805-808</u>	15	804	5
Limoneuse très sableuse	804- <u>807</u> -813-814-815-818	30	<u>806</u> • • - <u>809</u> • • -812 • • <u>813-814</u> • •	25	<u>802-805-806-808-809</u> • <u>812</u> • • - <u>814</u> • •	35
Limono-sableuse		0	<u>807</u> • •	5	<u>807</u> -813	10
Limono-argilo-sableuse	801 • -811-816-817	20	801-802-815-816-817 • • 818	30	801-811-817 • •	15
Limon argileux		0	811	5		0
Argile sableuse	819	5		0	818-819	10
Argile	803 • -810 •	10	803-819-810	15	815-816-810	15
Argile fine		0		0	803	5

NOTA : (1) Les numéros soulignés correspondent aux sites de LOSSA.

(2) 65 à 70 % des échantillons sont regroupés par une accolade.

(3) • Homogénéité texturale sur l'ensemble du solum.

• • " " " " " " (horizon de surface excepté).

Certains sols présentent toutefois une bonne homogénéité texturale sur l'ensemble de leur solum :

- . 3 sols de cuvette (n ° 801 - 803 - 810).
- . 1 sol sur sable éolien (n ° 800) ; soit 20 % des sites.

Ces sols appartiennent aux classes texturales extrêmes.

A souligner une série de sols à bonne homogénéité à l'exception de l'horizon de surface.

- . 3 sur bourrelet sableux et un sur dépôt éolien (n ° 804 - 812 - 814 et 809)
- . 2 sur cuvette dégradée (n ° 807 - 817)
- . 1 sur migmatite (n ° 806) ; soit 35 %.

Dans l'ensemble la moitié des sols étudiés offrent un solum sans discontinuité texturale.

pour les autres sols en dehors de l'horizon de surface il n'y a pas de discontinuité texturale mais des variations progressives avec la profondeur ; augmentation, enrichissement en éléments fins, à l'exception du site 802.

Dans la fraction argileuse la proportion de la quantité de l'altération de montmorillonite augmente de façon quantitativement et proportionnellement à la kaolinite des sols ou horizon sableux aux sols ou horizon argileux.

<u>Horizon</u>	<u>Texture</u>	<u>Kaolinite</u>	<u>Montmorillonite</u>
. rouge	S	28 à 31 %	15 %
. brun vertique	S-A	23 %	37 %
. brun rouge	A-S	25 %	45 %

(VALET)

Le résultat est un accroissement de la surface spécifique de ces horizons.

2 - Structure

Aucune méthode pratique permettant une mesure directe de la structure du sol (HILLEL 1974) n'existe. Cette dernière ne peut être appréciée que qualitativement et c'est par description surtout que l'on peut rendre compte de ce concept définissant l'arrangement réciproque dans l'espace des diverses particules dans le sol.

Toutefois il est possible d'apprécier et mesurer indirectement la structure par des méthodes d'analyse et de mesurer l'indice d'instabilité des agrégats (S. HENIN 1969).

2 - 1 Description :

Il est rare que la structure se développe identiquement sur l'ensemble du solum (Tableau 10). Ceci s'observe uniquement pour 6 sols (30 %), un sol sableux (800) et 5 sols à texture argilo-sableuse (801 - 816 - 817 - 819) à argileuse (810).

Tous les autres sols présentent de fortes discontinuités structurales, dont l'origine ne s'explique pas texturalement car cette dernière ne varie que progressivement, mais par les actions pédogénétiques.

10 sols ont des structures polyédriques, relativement bonnes donc, dont 4 à Lossa ; 9 par contre ont des structures exécrables, lamellaire à massive.

Malgré une saison à température élevée (maxi moyen $> 40^{\circ} \text{C}$), en avril, mai, à forte siccité et de fortes teneurs en argile il est rare qu'une "structure par fissuration" (DUCHAUFOR 1970) de la masse du sol se développe de façon importante. Les fentes séparant les agrégats cubiques et en plaquettes et même les fentes de retrait sont peu nombreuses et peu ouvertes. Ces dernières fissurent le sol sur des profondeurs de 40 à 60 cm avec une ouverture de 5 à 15 mm maximum.

2 - 2 Instabilité structurale :

La structure du sol n'est pas une caractéristique de grandeur fixe et constante mais susceptible de variation sous l'influence de facteurs externes (DUCHAUFOR 1970 - HENIN 1974).

TABEAU 10 : CLASSEMENT DES SOLS ETUDIES PAR TYPE DE STRUCTURE

Structure	En surface qq. cm	Horizon 5 - 10/25 cm	Horizon 10/25 - 50/80 cm
Particulaire	800 - 802	<u>805</u> - <u>806</u> - <u>808</u>	
Continue		800	800
Polyédrique		811 - 812 - 813 - 814 - 818	804 - <u>805</u> - <u>806</u> - <u>808</u> - <u>809</u> (811 - <u>812</u> - <u>813</u> - <u>814</u> *)
Cubique	801	802 - 803 - <u>809</u> - 815	
Prismatique		804	(811 - 812 - 813) * (817 - 810 - 819*) - 818
Lamellaire		<u>807</u>	803 - 815
Massive		801 - 810 - 816 - 817 - 819	801 - 802 - <u>807</u> - 816 (810 - 817 - 819) *

NOTA : Les chiffres soulignés correspondent aux sites étudiés de LOSSA.

* Des sites sont situés dans plusieurs rangées quand leur structures appartient à 2 unités.

L'analyse de la stabilité structurale permet une classification des différents sites étudiés. (Tableau 11).

C'est ainsi que les sols les plus stables sont sableux à sablo-argileux. Les sols les plus instables dont la structure est sensible soit à un travail du sol intensif soit une hydratation brutale, appartiennent aux sols les plus argileux et/ou les plus sodés. (11 sites sur 20 soit 55 %).

Cette mauvaise stabilité va influencer diverses propriétés de ces sols : faible porosité, hydromorphie et induire des tendances à l'asphyxie.

L'instabilité structurale dépend bien de la teneur en sodium. L'étude de la corrélation entre la valeur de l'instabilité structurale (HENIN 1976) et la teneur en sodium échangeable du complexe absorbant fait apparaître une étroite liaison très significative.

Is

		1	2
Coefficient de corrélation	r	0,74	0,71
Valeur du test student	t	24,5	29,52
Degré de liberté	dl	20	28
Probabilité d'avoir une valeur supérieure à valeur du test si hypothèse nulle est vrai ($r = 0$).		P \approx 0	P \approx 0

(Note 1 d'après des analyses d'échantillons prélevés par VALET 1976

2 d'après des analyses d'échantillons prélevés par FEAU 1976)

3 - Alcalisation

Les ions sodiques libérés par altération de la migmatite calco-alcaline, ne sont pas éliminés par lessivage. Ils restent donc confinés, dans le paysage en concentration variable. Ces ions vont se fixer sur les feuillets argileux en équilibre avec la solution du sol.

Les forts pH, pouvant atteindre 9, reflète la présence de ce sel fixé qui, sous pluie ou irrigation, est libéré par hydrolyse des argiles sodiques.

Ceci entraîne une dispersion des argiles qui confère à ces sols une "structure asphyxiante" ; une faible porosité, de même qu'une forte compaction, car le volume des pores grossiers tend à s'an-nuler.

TABLEAU 11 : CLASSEMENT DES SOLS SELON LEUR INSTABILITE STRUCTURALE

Stabilité structurale	Valeur Is	N ° Sites	Profondeurs		
		0 - 50 cm	50 - 100 cm	>100 cm	
Bonne	< 2	800- <u>805</u> - <u>808</u> - <u>809</u>	800- <u>809</u>	800-802- <u>809</u> -819	
Moyenne	2 < Is < 3	<u>806</u> -815-818	802- <u>808</u>	804- <u>808</u>	
Mauvaise	3 < Is < 5	802-804-811-816-817-819	801-805- <u>806</u> -811-815-816- 818-819	818	
Très mauvaise	Is > 5	801-803- <u>807</u> -810	803-804- <u>807</u> -810-817	801-803- <u>805</u> - <u>806</u> - <u>807</u> -815- 817	

NOTA : Les numéros soulignés correspondent aux sols de LOSSA.

La corrélation entre les pH et la teneur en sodium échangeable exprimée en m. eq/100 g de terre et en % de la somme des bases échangeables est significative.

<u>pH fonction de</u>	<u>Na + m. eq/100</u>	<u>Na %</u>
Coefficient de corrélation r	0.75	0.79
Degré de liberté dl	33	33
Valeur du test student t	43.45	56.43
Probabilité d'avoir valeur supérieure à la valeur test si hypothèse nulle est vraie (r = D)	P ≈ 0	P ≈ 0

La teneur en Na + exprimée en % de la somme des bases échangeables se répartit ainsi :

Na+ en % de la somme des bases ech.	Nombre d'horizons en %	
	<u>Surface</u> 0 - 20 cm	<u>Profondeur</u> 20 - 100 cm
2 %	70	65
10 - 20 %	25)) 30	5)) 35
20 - 30 %	5)	30)

Dans l'ensemble le nombre d'horizons alcalins n'augmente que très peu de la surface en profondeur (+ 5 %). Mais la valeur elle augmente fortement. Donc des analyses de surface pourraient renseigner à 5 % près de la concentration sur l'ensemble du profil.

Pour des valeurs de Na + supérieures 5 % de la somme totale des bases l'amélioration d'instabilité de la structure ne peut se réaliser qu'après élimination du sodium.

Les valeurs de pH supérieures à 8 subissent un fort glissement de 25 % avec la profondeur vers des valeurs plus fortes, pouvant dépasser 9. En surface le pH apparait comme un facteur discriminant assez faible de la teneur en sodium, sauf si l'on retient 7 comme valeur seuil.

pH = Valeur	Nombre d'horizons en %	
	Surface 0 - 20 cm	Profondeur 20 - 100 cm
< 7:	55	60
7 - 7.5	30)	0
9) 45	20)
> 9	15)) 40
	0	20)

Mais cette valeur reste incertaine.

4 - Densités réelles et apparentes :

La densité réelle (D) représente la densité des particules, exprimée en g/cm³ ou poids spécifique de la masse solide du sol. Elle dépend donc des constituants physico-chimiques du sol (nature et taille).

La densité apparente (ρ_a) à l'état sec* donne le rapport entre la masse des particules sèches et le volume total du sol, y compris les particules et les pores, exprimée également en g/cm³. Elle est donc influencée par la structure du sol, la compaction et la possibilité de gonflement des argiles.

* Poids de sol rapporté à la terre séchée à 105 ° C.

4 - 1 Densité réelle (D)

La densité réelle la plus répandue est de l'ordre de 2.60. Toutefois des densités plus faibles sont observées, 2.57 à 2.59 (5 sites) et une particulièrement basse 2.48 pour le vertisol (803) très argileux et très limoneux (diagramme des textures - SONA).

4 - 2 Densité apparente sèche (da)

Les densités apparentes mesurées "in situ" sont toujours très élevées pour l'ensemble des sols des deux périmètres (Tableaux 12 et 13).

On remarque :

- . sur les 20 premiers centimètres 90 % des sites ont des densités supérieures à 1.60, dont 20 % au-dessus de 1.70, et 60 % ont une densité supérieure à 1.65.
- . entre 20 et 100 cm 75 % présentent des densités supérieures à 1.60, dont 20 % entre 1.70 et 1.80 et 20 au-dessus de 1.80.
- . entre 100 et 200 cm 82 % des sols ont encore une densité supérieure à 1.60, dont 29 % entre 1.70 et 1.80 et 24 % au-dessus de 1.80.

Avec la profondeur le nombre de sols dont la densité augmente jusqu'à 1.70 et celui où elle dépasse 1.80 est nettement plus important. La densité des horizons mesurée à une profondeur supérieure à 1 mètre est toujours plus élevée sur les sols bruns de Lossa développés sur les altérites et la rochemère plus ou moins désagrégée. (Tableau 14).

En ce qui concerne les horizons de surface et profonds il n'apparaît pas de liaison entre la densité apparente et la texture.

Avec la structure en surface il en est de même quoique l'on puisse cependant observer que des sols à plus forte densité (>1.70) ont le plus souvent les structures les plus massives. Pour la limite 1.65 de ceux de la classe 1.60 - 1.70, la structure n'apparaît pas comme un élément discriminant, tout au moins pour un si petit échantillonnage.

Par contre pour les horizons compris entre 20 et 100 cm la liaison structure-densité se confirme nettement et la limite de 1.70 sépare visiblement les horizons mieux structurés (structure polyédrique, cubique et lamellaire oblique) de ceux mal structurés (massifs avec ou sans sous-structure polyédrique ou prismatique).

TABLEAU 12 :

DENSITE APPARENTE SECHÉ (mesurée au gammadensimètre)

Périmètres		SONA					LOSSA				
Sites		S 800	S 801	S 802	S 803	S 804	< 805	< 806	< 807	< 808	< 809
Profondeur cm											
de	à										
0	20	1.70	1.69	1.72	1.64	1.65	1.61	1.62	1.67	1.67	1.68
20	40	1.54	1.70	1.70	1.68	1.54	1.61	1.68	1.91	1.60	1.56
40	60	1.57	1.71	1.72	1.59	1.54	1.66	1.68	1.88	1.61	1.64
60	80	1.58	1.66	1.73	1.59	1.58	1.72	1.63	1.83	1.78	1.59
80	100	1.60	1.66	1.69	1.58	1.60	1.77	1.66	1.88	1.90	1.69
100	120	1.59	1.68	1.65	1.54	1.63	1.72	1.60	1.79	1.83	1.80
120	140	1.60	1.61	1.65	1.54	1.67	1.72	1.70	1.81	1.81	1.72
140	160	1.61	1.69	1.64	1.66	1.73	1.73	1.80	1.89	1.84	1.93
160	180	1.59	1.68	1.63	1.61	1.74	1.77	1.70	2.05	2.07	1.83
180	200	1.59	1.66	1.69	1.59	1.66	1.89	1.68	1.98	1.93	1.81
Type de sol		Sol du- naire peu évo- lué	Sol hy- dromorphe à tendan- ce halo- morphe	Sol brun rouge	Vertisol	Sol hy- dromorphe à pseudo- nappe	Sol brun à pseudo- gley	Sol brun	Sol brun hydromor- phe	Sol brun rouge	Sol brun

NOTA : _____ limite de perméabilité.

----- ralentissement de la percolation.

TABLEAU 13 : DENSITE APPARENTE SECHE (da) SONA

Profondeur cm	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819
0 - 20	1.76	1.76	1.68	1.66	1.67	1.65	1.65	1.47	1.37	1.73
20 - 40	1.72--	1.69	1.49	1.68	1.63	1.58	1.68	1.89	1.78--	1.70
40 - 60	1.71	1.62	1.53	1.65	1.58	1.57	1.63	1.92	2.00	1.98
60 - 80	1.66	1.53	1.60	1.69	1.65	1.58	1.58	1.64	1.77	1.86
80 - 100	1.54	1.46	1.65	1.73	1.67	1.61	1.57		1.58	1.68
100 - 120	1.51	1.49	1.64	1.74	1.70	1.63	1.56			1.74
120 - 140	1.53	1.60	1.74	1.75	1.75	1.68	1.58			
140 - 160	1.52	1.84	1.77	1.74	1.76	1.73	1.66			
160 - 180	1.54	2.00	1.76	1.74	1.76	1.72	1.63			
180 - 200	1.55	2.12	1.76	1.75	1.76	1.69	1.59			
Type de sol	Sol hydromorphe à pseudo-gley très alcalisé	Sol brun rouge sur sable, argileux alluvial		Sol hydromorphe à gley de nappe		à amphigley		à pseudogley		

NOTA : ---- ralentissement de la perméabilité

— limite de perméabilité

TABLEAU #14 : REPARTITION DES SOLS SELON CLASSE DE DENSITE

Densité apparente sèche	0-20 cm	%	20-100 cm	%	100-200 cm	%
1.40 - 1.50	817 - 818	10	-		-	
1.50 - 1.60	-		800-803-804- <u>809</u> -815	25	800 - 803 - 810	18
1.60 - 1.70	800 - 801 - 803*-804*		<u>806</u> - <u>808</u>	35	801-802-804-815-816	29
	<u>805</u> *- <u>806</u> *- <u>807</u> - <u>808</u>	70	811-812-813-814-816			
	<u>809</u> -812-813-814-815*- <u>816</u> *	(1)				
1.70 - 1.80	802-810-811-819	20	801-802- <u>805</u> -810	20	<u>805</u> - <u>806</u> -812-813-814	29
> 1.80			<u>807</u> -817-818-819	20	<u>807</u> - <u>808</u> - <u>809</u> -811	24

NOTA : Les numéros soulignés correspondent au périmètre de LOSSA.

(1) 43 % des sols ont une densité entre 1.60 et 1.65 (soit 30 % sur l'ensemble).

Pour les horizons inférieurs à 1 mètre, bien que le nombre d'observations soit plus faible, la liaison structure-densité reste aussi nette.

Pour chaque sol, elles croissent donc avec la profondeur en passant par un maximum situé entre 30 et 60 cm de profondeur (10 sites) et par un minimum qui varie de 30 à 100/120 cm pour tous les sites, à l'exception du sol peu évolué sur sable dunaire (800) dont la densité en surface est plus élevée (1,70) qu'en profondeur (1,60).

De premières observations montrent que :

- ces renflements de densité apparente coïncident le plus souvent avec des structures massives (7 sites)*, quelque fois lamellaire oblique (2 sites) et une seule fois avec une structure polyédrique (806) ;

- lorsqu'ils n'existent pas, la densité apparente alors est plus élevée en surface et correspond à des horizons dont la structure ou sous-structure est prismatique. Peut-être alors ce sont des sols à horizons supérieurs tronqués et/ou qui ont subi un tassement du au ruissellement ;

- dans le cas des minima, selon le site, ils sont assez dispersés, 1,45 à 1,80 et dans 16 sites sur 18 ces plus faibles densités correspondent toujours à un changement de structure (801, 803, 808 par ex) et pour 10 d'entre eux seulement la courbe de la teneur en argile évolue comme celle des densités (810, 811, 814 par exemple).

5 - Porosité totale

La porosité totale représente le volume total des pores ou des interstices compris entre et dans les agrégats, soit entre les particules du sol. Sa valeur est exprimée en % du volume du sol et calculée d'après la formule :

$$Pt \% = 100 \times \frac{D - d}{D}$$

Dans tous les cas la porosité totale est basse car toujours inférieure à 40 (tableaux 15). Elle diminue avec la profondeur. Deux groupes de sols apparaissent dont la limite de porosité est située à 35 %.

TABLEAU 15 : CLASSES DE POROSITES

Catégories	Sites	Horizons cm	POROSITES				Micro en % de to- tale	Maxi en % de to- tale	Indice de compacité macro/mi- cro	Importance et nature de la porosité
			Totale	Maxi	Micro	Macro				
I	801	0-50	34.1	29.5	26.4	7.7	77.4	86.5	0.3	3 a
	803	0-30	32.0	37.0	35.7	1.3	96.5	115.6	0.04	3 a
	807 *	0-30	30.0	27.0	22.5	7.5	75	90.0	0.3	3 a
	810	0-50	33.3	41.5	28.0	5.3	84	120	0.18	3 a
	816	0-25	36.2	29.0	10.0	26.2	27.6	80.1	2.6	3 c
	817	0-50	33.5	31.6	21.6	11.9	64.5	94.3	0.55	3 a
	818	0-50	36.1	33.3	18.4	17.7	51	92.2	0.96	3 b
	819	0-50	31.9	36.2	24.2	7.7	45	114	0.32	3 a
II		0-50	33.5	34.8	30.9	2.6	92	104	0.08	a
	802	50-100	33.5	22.7	19.7	13.8	59	68	0.7	3 b
		100-150	36.2	17.9 (1)	17.1	18.9	47	49	1.1	c
		0-50	33.7	27.9	18.0	15.7	53	83	0.87	3 b
	811	50-100	40.8	12.7	11.2	29.6	27	31	2.6	2 c
		100-150	38.0	-	-	-	-	-	-	-

NOTA : * Site de LOSSA

(1) sur 130 cm

TABLEAU 15 : (suite) CLASSES DE POROSITE

Catégories	Sites	Horizons cm	POROSITES				Micro en % de tota- le	Maxi en % de tota- le	Indice de compacité macro/mi- cro	Importan- ce et na- ture de la poro- sité
			Totale	Maxi	Micro	Macro				
II	812	0-50	39.2	32.0	12.4	26.8	31.6	81.6	2.16	c
		50-100	38.0	24.9	18.2	19.8	47.9	65.6	1.1	3 c
		100-150	34.0	24.0	18.0	16.0	52.9	78.6	0.9	b
	813	0-50	35.5	21.2	11.7	23.8	33.0	59.7	2.0	c
		50-100	34.2	22.4	19.1	15.1	55.8	65.5	0.8	3 b
		100-150	32.4	-	-	-	-	-	-	-
III	806 *	0-50	36.0	27.5	12.4	17.6	50	71.3	1.0	c
		50-100	36.0	21.2	18.6	17.4	51.6	58.8	0.9	3 b
		100-150	33.2	19.2	17.9	15.3	54	57.8	0.8	b
		150-200	33.2	14.2	-	-	-	43.6	-	-
	805 *	0-50	37.5	29.3	22.8	14.7	61	70.1	0.6	b
		50-100	32.5	32.0	31.3	12.0	96	98.4	0.04	3 a/b
		100-150	32.5	33.0	32.5	0.0	100	101.5	0.02	a
		150-200	29.0	26.0	-	-	-	89.8	-	-
	815	0-50	38.0	34.0	15.4	22.6	40.5	89.5	1.5	c
		50-100	38.6	22.0	20.0	18.6	51.8	58.0	0.9	3 b
		100-150	38.9	-	-	-	-	-	-	-

TABLEAU 15 : (suite) CLASSES DE POROSITES

Catégories	Sites	Horizons cm	POROSITES				Micro en % de to- tale	Maxi en % de to- tale	Indice de compacité macro/mi- cro	Importance et nature de la po- rosité
			Totale	Maxi	Micro	Macro				
III	804	0-50	39.2	31.6	17.1	22.1	43.6	80.6	1.3	c
		50-100	39.2	30.2	25.6	13.6	65.0	77.0	0.5	3 b
		100-150	36.2	32.6	27.9	8.3	77.0	90.0	0.3	a
		150-200	34.5	35.5	-	-	-	182.0	-	-
	809 *	0-50	37.8	28.0	21.6	16.2	57	74.0	0.8	b
		50-100	37.2	25.5	23.9	13.3	64	68.5	0.6	3 b
		100-150	30.8	21.2	19.4	11.4	63	68.8	0.6	b
		150-200	29.4	18.1	17.4	12.2	60	61.5	0.7	b
IV	808 *	0-50	37.2	27.0	17.8	19.4	48	72.5	1.1	c
		50-100	30.8	19.7	18.5	12.3	60	63.9	0.7	3 b
		100-150	30.2	21.3	20.4	9.8	68	70.5	0.5	b
		150-200	24.8	16.8	15.9	8.9	64	67.7	0.6	b
V	800	0-50	38.0	31.1	10.4	27.6	27.3	81.8	2.7	c
		50-100	38.6	27.6	8.6	30.0	22.3	71.5	3.5	3 c
		100-150	38.0	25.2	7.2	30.8	20.0	66.3	4.3	c
		150-200	38.7	23.7	8.3	30.4	21.0	61.2	3.7	c

* Sites de LOSSA

Pt < 35 % = sols de cuvette, argileux à argilo-sableux (40 %).

Pt > 35 % = sols sablo-argileux à sableux (60 % des sols).

Ces faibles porosités vérifient bien le peu d'importance de porosités grossières et des fentes de ces sols observés dans les profils. Rares et peu importants en effet apparaissent et se développent les fentes de retrait.

6 - Infiltration

L'infiltration peut se définir comme le processus d'entrée de l'eau dans le sol à travers la surface et verticalement (HILLEL 1974), dans les interstices d'un corps poreux sec (MARTY - COUREAU). A ne pas confondre avec la filtration qui caractérise le "passage de l'eau à travers ce même corps poreux" (MARTY - COUREAU). Cette traversée "per descendum" de l'eau dans le sol est matérialisée par la progression du front humide (POURRUT, ZEBROSKY 1970) ou d'humectation (COUCHAT 1972 - MARCESSE 1967 - VALET 1974) ou d'humidification (HILLEL 1974) ou correspondant au "wet front" des anglosaxons (LETEY 1961) limitant la "wetting zone".

Comme cela a déjà été souligné (POURRUT ZEBROSKY 1970) cette notion d'infiltration n'a pas de valeur hydrologique certaine car elle ne mesure pas vraiment la perméabilité du sol. Car cette méthode supprime l'effet de l'horizon de surface responsable du ruissellement, mais par contre elle présente un très grand intérêt agronomique et hydraulique. Elle est facilement reproductible dans des conditions identiques définies à priori et adaptables aux problèmes que l'on veut résoudre. Elle complète valablement les prospections pédologiques en fournissant des résultats beaucoup plus proches de la réalité que ceux obtenus en laboratoire sur microprélèvements ou sur échantillons remaniés.

6 - 1 Vitesse d'infiltration apparente (V_i -cm/h) :

Pour tous les sols cette vitesse décroît au cours d'une même irrigation et d'une irrigation à l'autre à mesure que l'humidité du sol augmente ; que la porosité donc se remplit. Cette vitesse tend vers des valeurs constantes. (cf tableaux 16 et 17).

A partir de ces vitesses les sols ont été classés en catégories. Ces catégories ont été déterminées dans un but agronomique et non hydrologique, c'est pourquoi cette classification est basée sur les vitesses d'infiltration moyennes sur 12 heures d'infiltration après la première humectation et non sur les vitesses constantes en sol saturé.

TABLEAU 16 : VITESSE D'INFILTRATION APPARENTE (Vi) MOYENNE HORAIRE ET CONSTANTE EN CM/H

ETAT DU SOL		SOL SEC				HUMIDE				Vi const. cm/h	Classe de perméa- bilité en cm/h
Catégories		HEURES				HEURES					
n ° sites		2 lères	5 suiv.	5 suiv.	Moy. sur 7/12 h	2 lères	5 suiv.	5 suiv.	Moy.		
I	801	3.3	0.28	0.24	0.76	0.24	0.16	0.06	0.12	0.04	Vi < 0.6 peu à pas perméable
	803	11.4	0.36	0.09	2.00	0.06	0.06	0.06	0.06	0.03	
	807	6.2	0.7	0.3	1.45	0.3	0.16	0.06	0.14	0.03	
II	802	6.9	1.4	0.8	2.06	3.5	0.8	0.8	1.1	0.8	0.6 < Vi < 2 perméabilité faible à moy. lente
III	806	12.7	4.1	-	6.5	6.8	-	-	-	3.6	2 < Vi < 12 perméabilité modérée à moy. lente
	809	15.0	7.6	-	9.6	9.7	-	-	-	4.1	
	804	22.0	-	-	-	-	-	-	-	5.0	
	805	21.4	-	-	-	11.8	-	-	-	9.0	
IV	808	24.6	-	-	-	-	-	-	-	16.0	12 < Vi < 25 bonne perméabilité
V	800	43.0	-	-	-	30.0	-	-	-	30.	Vi > 25 perméabili- té très bonne

TABLEAU 17 : VITESSE D'INFILTRATION APPARENTE (Vi) MOYENNE HORAIRE ET CONSTANTE en cm/h

		ETAT DU SOL	SOL SEC					SOL RESSUYE					
Cat. n ° Site	n ° SOLS (1) types		Heures			Moy. s/12 h	Vites- se cst cm/h	Heures			Moy. s/12 h	Vites- se cst cm/h	Classe de perméabili- té
			2 lèrès	5 Suiv.	5 Suiv.			2 lèrès	5 Suiv.	5 Suiv.			
I	810	Sols hydromorphes minéraux 4-à pseudogley vertiques (argile)	0.0	0.6	0.5	0.95	0.3						Vi < 0.6 peu à pas perméable
	817	6-sols hydromorphes minéraux à pseudogley (arg.)	2.8	0.36	0.25	0.71	0.17						
	818	sableuse à argile	2.3	0.4	0.4	0.71	0.02						
	819		1.8	0.5	0.5	0.73	0.25						
	816	10-sols hydromorphes minéraux à amphigley (argile)	1.9	0.1	0.1	0.40	0.20						
II	811	3-sols brun-rouge (sable argileux alluvial)	3.0	0.6	0.5	0.95	0.5						perméabilité moyennement lente à mo- dérée 0.6 < Vi < 2
	812	sols brun-rouge	14.0	5.9	3.0	6.04		5.0					
	813	2-(sable alluvial)	7.0	4.2	4.0	4.58		3.8				1.9	
	814		12.5	4.8	-	(6.08)						1.6	
III	815	5-sols hydromorphes à gley (sable alluvial)	12.5	5.0	4.8	6.16	-	9.0	5.1	1.7	4.33	3.5	bonne perméabilité 2 < Vi < 12

NOTA : (1) Les numéros renvoient à la légende de la carte morphopédologique IRAT.

Catégorie I - Sols peu à pas perméables ($V_i < 0,6$ cm/h) :

Sur sol sec : $V_i < 0,6$

Sur sol humide : $V_i < 0,1$ à $0,06$ cm/h.

<u>Sites</u>	<u>-</u>	<u>Unités</u>	<u>Typologie</u>
801	-	7	Sol hydromorphe minéral à pseudogley, sodique
803	-	8	Vertisol, alcalisé
807	-	10	Sol brun subaride à hydromorphe de surface
810	-	7	Sol hydromorphe minéral à pseudogley, alcalisé
816	-	10	Sol hydromorphe à amphigley
817)		
)	- 6	Sol hydromorphe minéral à pseudogley
818)		
)		
819)		
811	-	3	Sol brun-rouge sur sable argileux

Catégorie II - Sols à perméabilité faible à moyennement lente : $0,6 < V_i < 3,0$.

Sur sol sec : $1,4 < V_i < 6$ cm/h

Sur sol humide : $0,8 < V_i < 1,9$ cm/h

<u>Sites</u>	<u>-</u>	<u>Unités</u>	<u>Typologie</u>
802		2	Sol brun-rouge sur sable argileux.
812)		
)		
813)	- 2 -	Sol brun-rouge sur sable argileux.
)		
814)		

Catégorie III - Sols à perméabilité moyennement lente à modérée : $3 < V_i < 12$ cm/h.

Sur sol sec : $6 < V_i < 9$ cm/h

Sur sol humide : $3,5 < V_i < 9$ cm/h

<u>Sites</u>	-	<u>Unités</u>	<u>Typologie</u>
815	-	5	Sol hydromorphe minéral à gley de nappe
816	-	3	Sol brun subaride à pseudogley profond
809	-	2	Sol peu évolué d'apport éolien jaune
804	-	4	Sol hydromorphe à gley de nappe
805	-	4	Sol brun subaride à pseudogley profond

Catégorie IV - Sols à bonne perméabilité : $12 < V_i < 25$ cm/h.

Sur sol sec : $V_i \approx 20$ cm/h

Sur sol humide : $V_i \approx 16$ cm/h

<u>Sites</u>	-	<u>Unités</u>	<u>Typologie</u>
808	-	1	Sol peu évolué d'apport éolien rouge

Catégorie V - Sols à très bonne perméabilité : $V_i > 25$ cm/h.

Sur sol sec : $V_i > 40$ cm/h

Sur sol humide : $V_i > 30$ cm/h

<u>Site</u>	-	<u>Unité</u>	<u>Typologie</u>
800	-	1	Sol peu évolué d'apport éolien (cartes 2 et 3)

6 - 2 Vitesse de progression du front d'humectation: VF cm/h.

La vitesse de progression du front d'humectation, comme celle d'infiltration apparente décroît au cours d'une même irrigation et ce d'autant plus vite que les sols ont une moindre perméabilité, pour tendre vers des valeurs constantes de filtration. Celle-ci, après le remplissage des pores les plus fins, ne représente que la circulation soumise à la gravité et à la pression due au débit d'irrigation jusqu'à la limite d'infiltrabilité. Elle s'effectue donc dans les macropores. La vitesse de filtration sera donc régit par l'importance de la porosité grossière du sol. Cette dernière qui participe entièrement à la filtration a été appelée "porosité efficace" (MARTY-COURAUD).

On peut encore regrouper les résultats des sols étudiés en 5 catégories compte-tenu cette fois de la vitesse constante du front d'humectation. (Tableau 18).

Catégorie I - Sols peu à pas perméables : VF < 0,6 cm/h.

Vitesse constante : 0,07 à 0,6 cm/h après 13 à 46 heures.

<u>Sites</u>		<u>Unités</u>	<u>Typologie</u>
801	-	7	Sol hydromorphe minéral à pseudogley, sodique.
803	-	8	Vertisol, alcalisé.
807	-	10	Sol brun subaride à hydromorphie de surface.
810	-	7	Sol hydromorphe minéral à pseudogley.
816	-	10	Sol hydromorphe minéral à amphigley.
817)			
818)		6	Sol hydromorphe minéral à pseudogley
819)			

Catégorie II - Sols à perméabilité modérés : 0,6 < VF < 6 cm/h.

. Vitesse constante : 0,9 à 2,2 cm/h après 20 heures.

<u>Sites</u>		<u>Unités</u>	<u>Typologie</u>
804	-	4	Sol hydromorphe à gley de nappe.
805	-	2	Sol peu évolué d'apport éolien jaune.

Dans le cas du 804 la nappe phréatique est beaucoup plus profonde et la frange capillaire ne remonte qu'à 100 cm.

TABLEAU 18 :

VITESSES MOYENNES HORAIRES ET CONSTANTES DE PROGRESSION

DU FRONT D'HUMECTATION

(Vf) en cm/h

Catégories		HEURES				Moy.	Vites- se cste cm/h	CLASSE DE PERMEABILITE cm/h
		1ère	2 suiv	5 suiv	5 suiv			
I	801	19.5	0.35	0.19	0.19	1.7	0.2	Peu à pas perméable Vf < 0.6
	803	8.0	4.1	1.4	0.4	1.9	0.4	
	807	18.0	1.5	0.2	0.2	3.1	0.2	
II	802	52.0	8.0	3.2	2.1	6.7	2.2	0.6 < Vf < 6 perméabilité modérée
III	806	52.0	16.5	3.6	1.8	8.6	12.0	Perméabilité moyennement bonne 6 < Vf < 12
	805	87.0	15.0	1.8	0.8	10.0	10.0	
IV	809	66.0	80.0	-	-		20.0	Perméabilité bonne 12 < Vf < 25
	804	88.0	16.0	-	-		19.0	
V	808	148.0	-	-	-		45.0	Vf > 50
	800	106.0	50.0				30.0	Perméabilité très bonne

TABLEAU 18 : VITESSE DE PROGRESSION DU FRONT D'HUMECTATION en cm/h

Catégories Sites	Unités. Sols	Vitesse constante	V. cste après la durée en h.	Classe de perméa- bilité
I	810 7-sols hydromorphes minéraux à pseudogley vertiques	0.07	23	Vf très lente
	817 6-sols hydromorphes minéraux à	0.4	25	Vf < 0.6
	818 pseudogley	0.3	47	
	819	0.6	46	
	816 10-sols hydromorphes miné- raux à amphigley	0.2	3	
II	811 3-sols brun-rouge sable argileux	1.75	19	Vf moyen nement lente
	812 2-sols brun-rouge	1.9	21	
	813 sableux	1.0	(120)	0.6 < Vf < 6
	814	0.9	26	
	815 5-sols hydromorphes minéraux à gley (nappe) sableux	3.3	2	

Catégorie V - Sols à très bonne perméabilité VF 25 cm/h.

Vitesse constante : 30 à 50 cm/h.

<u>Sites</u>	-	<u>Unités</u>	<u>Typologie</u>
800)	-	1	Sol peu évolué d'apport éolien rouge.
808)			

Le front d'humectation où le gradient d'humidité est brutal et apparaît comme une limite nette entre la partie humide et la partie sèche du profil.

Le front d'humectation devient moins tranché et moins abrupt (HILLEL 1974) avec la profondeur avec la diminution du flux. Il est de même dès la surface pour certains sols moins perméables (sols de la catégorie II et III).

7 - Remplissage

Le remplissage du sol jusqu'à la limite d'imperméabilité pour les sols de la catégorie I et jusqu'à 2 mètres pour ceux des autres catégories a nécessité des temps variables selon les types de sol (Tableau 19).

D'après ces temps les sols se regroupent bien comme les 5 catégories déterminées par la vitesse de progression du front d'humectation (qui en fait les conditionne).

Outre ces vitesses pour humecter une profondeur donnée on peut apprécier aussi la profondeur utile de sol c'est-à-dire celle qui est facilement humectable par les pluies et les irrigations.

On pourra ainsi classer les sols suivant leur profondeur utile et la rapidité avec laquelle elle est humectée.

. Sols à faible et très lente répartition de l'eau dans le profil

Profondeur utile < 50 cm atteinte en plus de 20 heures.

Catégorie I.

TABEAU 19 : TEMPS MIS PAR LE FRONT D'HUMECTATION POUR ATTEINDRE CERTAINES PROFONDEURS

Catégories	Sites	EN SOL SEC		
		50 cm	100 cm	150 cm
I	801	11 jours	(1)	(1)
	803	14 jours	"	"
	807	7 jours	"	"
	810	44 heures	"	"
	811	14 heures	"	"
	816	23 heures ⁽²⁾	"	"
	817	40 heures	"	"
	818	40 heures	"	"
	819	20 heures	70 heures	"
II	802	57'	16 h	13 jours
	812	40'	4 h	(1)
	813	6 h	50 h	(1)
	814	1 h 30'	30 h	(1)
III	815	1 h 10'	10 h	(3)
	805	12'	1 h 10'	48 h
	806	58'	6 h 50'	50 h
IV	809	47'	1 h 16'	2 h 14'
	804	34'	1 h 15'	(3)
V	808	15'	28'	66'
	800	22'	42'	1 h 55'

NOTA : (1) Profondeur jamais atteinte.

(2) 20 cm humectable.

(3) La nappe phréatique ralentit la descente du front d'humectation.

LOSSA - Sites 805 - 809

SONA - Sites 800 à 804 et 810 à 819.

. Sols à répartition moyenne et lente de l'eau.

- . Profondeur utile : 50 cm en moins de 6 heures.
- :
: 100 cm en 4 à 30 heures.

Catégorie II.

. Sols à répartition satisfaisante mais moyennement lente.

- . Profondeur utile : 100 cm en 1 à 10 heure.
- :
: > 150 cm en plus de 40 heures.

Catégorie III.

. Sols à répartition satisfaisante et rapide à très rapide.

- . Profondeur utile : 150 cm en 2 heures maximum.
- :
: > 200 cm.

Catégories IV et V.

Le remplissage du sol ou le déplacement du front d'humectation, s'opère sous deux forces qui jouent concurremment : la pesanteur et la force de succion du sol sec.

Le deuxième phénomène a donc tendance à limiter le premier au début de la filtration.

Dans les conditions de réalisation de ces essais, soit sous submersion, le déplacement du front d'humectation s'opère selon trois processus, dans la zone supérieure de 30 à 50 cm.

1°/ après saturation apparente de la zone.

Sols des catégories I (816) II, III (815) IV et V.

2°/ avant même la saturation apparente de la zone.

Catégorie I.

(plusieurs jours avant : 2 à 6 jours).

3°/ avec une certaine avance sur la saturation apparente de la zone.

Catégorie III (805 et 806).

(quelques heures avant).

Cette valeur de l'humidité maximum obtenue sous submersion représente la capacité de saturation des sols et traduit la capacité maximale de remplissage en eau du réservoir sol, dans les conditions de l'expérimentation.

8 - Ressuyage des sols

Après l'arrêt des irrigations, la redistribution de l'eau dans le profil continu vers les zones sèches profondes toujours sous l'effet de la pesanteur et des forces de succion.

Dans un premier temps une grande quantité d'eau différente selon les horizons et les sols, ressuye rapidement mais très vite la vitesse de ressuyage diminue et devient négligeable. Car après la disparition de l'eau dite gravifique, l'eau au fur et à mesure du dessèchement est de plus en plus solidement retenue par les forces capillaires. La conductivité hydraulique a fortement décru et le flux est négligeable mais la redistribution ou le drainage ne cesse pas pour autant même si il est considérablement réduit.

L'étude des variations d'humidité des profils en fonction du temps montre que la diminution de stocks d'eau obéit à des régimes décroissants plus ou moins bien tranchés, différents et non fixes qui sont liés à la géométrie du milieu.

- un régime rapide,
- un régime moyen,
- un régime lent.

Ces trois régimes ne s'observent que dans les sols les plus filtrants et perméables (800 - 805 - 808 - 809 - 812 - 814 - 815 *) ; dans les autres le régime passe sans transition du régime rapide au régime lent.

Le ressuyage s'effectue parallèlement au profil de départ. Les pertes en eau sont sensiblement égales en tous les points du profil, comme cela a été de nombreuses fois souligné (MARCESSE 1967 - COUCHAT - POURRUT 1970) en l'absence de flux ascendant due à l'évapotranspiration ou à l'évaporation.

* 2 exceptions : 804 et 813.

9 - Humidité minimum et capacité de saturation

L'humidité minimum des profils avant la mise en eau a été retenue comme l'humidité assimilée à celle du flétrissement permanent. Cette mise en eau a commencé le 12/12/75 pour le premier profil soit 2 mois après la dernière pluie.

Si elle est voisine de l'humidité à pF 4,2 obtenue en laboratoire pour les horizons et sols sableux (sites 800 - 802 - 806 - 808), elle est supérieure dans le cas des sols perméables (804 - 805 - 809) et inférieure dans le cas des sols imperméables (sites 801 - 803 - 807).

L'humidité maximum qui mesure la capacité de saturation apparente du profil dans les conditions d'expérimentation correspond à la porosité maximum ainsi déterminée.

Cette humidité est toujours inférieure à la porosité totale des matériaux constitutifs des sols.

Elle dépasse rarement 30 % sauf pour des horizons de surface et elle diminue rapidement avec la profondeur ; beaucoup plus rapidement même que la porosité totale. (Tableau 15).

10 - Capacité de rétention au champ (C. R.)

En agronomie la connaissance de la capacité de rétention pour l'eau des sols est importante à connaître.

Capacité de rétention et capacité au champ sont l'expression d'une même donnée mais déterminée par des méthodes d'approche différentes.

La capacité de rétention (C. R.) est déterminée en laboratoire sur échantillons remaniés (tamisés) sous des forces de suctions différentes selon la granulométrie de l'échantillon (pF 2,0 à 3,2) COMBEAU 1960, PERIGAUD 1968, CHARREAU 1960, GRAS 1965, PERKLAND, BOEKE L, BALLIG, etc...) ou par centrifugation. Dans ce dernier cas on parlera plutôt d'humidité équivalente (H.E.) (DUCHAUFOR 1970).

Elle représente la quantité maximum d'eau capillaire retenue par le sol en pourcent de matière sèche.

La capacité au champ (C.C.) est mesurée "in situ" après une forte irrigation ou pluie, saturantes. Elle correspond au point de passage du drainage rapide au drainage lent (FEODOROF 1962), soit après 1 à 2 jours de ressuyage (FEODOROF 1962, CHARREAU NICOU 1971) 2 à 3 jours (HILLEL 1974) ou 3 jours (DANCETTE 1970).

C'est donc la "quantité d'eau retenue dans le sol après que l'excédent ait drainé et en régime d'écoulement vers le bas réduit" (VESHMAYER et HENDRICKSON 1949).

L'expression capacité de rétention au champ, retenue ici définit le "comportement d'eau correspondant à la cinétique lente sous la seule intervention des forces capillaires. La capacité de rétention est donnée par l'ordonnée à l'origine de la droite". (MARCESSE 1967).

Donc elle est déterminée graphiquement à partir des courbes semi-logarithmiques d'évolution de l'humidité (cinétiques rapide et lente). C'est cette méthode qui est le plus souvent utilisée maintenant par de nombreux chercheurs (MARCESSE 1967, COUCHAT 1972, DANCETTE 1969, POURRUT et ZEBROSKY 1970, VALET 1974, VACHAUD, etc...).

La capacité de rétention ainsi déterminée varie avec les différentes catégories. De la catégorie I à V on obtient une même capacité de rétention de 100 mm pour une tranche de sol de plus en plus importante ; 40 cm pour la catégorie I à 90-130 cm pour la catégorie V. (Tableau 20).

Ces capacités de rétention sont obtenues après des temps variables qui croissent avec l'imperméabilité du milieu.

- 36 heures pour les sols dunaires (800) - débit de ressuyage > 200 mm/jour.
- 24 à 30 heures pour les sols bruns isohumiques (806 - 808 - 809) débit de ressuyage entre 100 et 200 mm/jour.
- 48 à 60 heures pour les sols bruns mal drainés (805 - 804 - 815) débit de ressuyage entre 2 et 100 mm/jour.
- 70 à 100 heures pour les sols hydromorphes (802 - 811 - 812 - 813 - 814) débit de ressuyage entre 2 et 100 mm/jour.
- plus de 5 jours pour les sols hydromorphes peu à pas perméables (801 - 803 - 807 - 810 - 816 - 817 - 818 - 819) débit de ressuyage 2 mm/jour.

**TABEAU 20 : CAPACITE DE RETENTION (CR) IN SITU EXPRIMEE EN MM
POUR DES TRANCHES DE SOL DE 50 CM**

Catégories	Sites	C.R. en mm			
		0-50 cm	0-100 cm	0-150 cm	0-200 cm
I	801	107 (1)	-		
	803	143 (1)	-		
	807	99 (1)	-		
	810	149	-		
	811	97	(3)		
	816	56 (2)			
	817	117			
	818	104			
	819	133			
II	802	155	253	305 (5)	
	812	68	91	159	
	813	63	76	139	
	814	51	80	130	
III	815	82	(4) nappe	-	-
	805	114	271	433	463 (7)
	806	92	185	285	300 (7)
IV	809	108	228	325	378 (8)
	804	86	214	269 (6)	nappe
	808	89	182	204	284
V	800	52	95	131	173

NOTA : (1) sur 0-40 cm.
 (2) sur 25 cm.
 (3) très faible humectation en dessous de 70 cm.
 (4) nappe vers 80 cm.
 (5) sur 130 cm.
 (6) sur 120 cm - nappe en dessous.
 (7) sur 160 cm.
 (8) sur 180 cm.

La quantité d'eau infiltrée et ressuyée augmente ainsi avec les textures les plus sableuses et les perméabilités les plus élevées. Les valeurs pour des tranches arbitraires de 50 cm sont données dans le tableau 20.

Les valeurs dépassent largement 100 mm pour 50 cm de sol dans la catégorie I, sont de l'ordre de 100 mm pour les catégories II, III et IV mais n'atteignent que 50 mm pour les sols sableux de la catégorie I.

11 - Réserve en eau utile (R.U.)

L'eau utile peut être définie comme la quantité d'eau limitée par le profil d'humidité de la capacité de rétention et celui de l'humidité minimum.

Cette dernière humidité est proche de l'humidité au point de flétrissement permanent car dans presque tous les sols après 30 jours suivant la dernière pluie ces profils d'humidité n'évoluent plus. Elle ne correspond pas toujours pourtant à l'humidité déterminée à pF 4.2 en laboratoire.

La réserve en eau utile pour un sol variera donc avec la profondeur utile de sol de plus en plus épaisse quand ce dernier est de plus en plus sableux (Tableau 21).

Catégorie I	- 40 - 50 cm environ.
Catégorie II	- 60 - 120 cm environ.
Catégorie III)	- 80 - 110 cm environ.
)	
Catégorie IV)	- 180 cm environ.
Catégorie V	

Il est à noter que la profondeur maximum utilisable pour les catégories I et II ne dépasse pas respectivement 60 et 130 cm. La réserve utile en eau est donc limitée, alors que pour les sols des trois autres catégories la profondeur utile peut atteindre 200 cm et même en sol sableux dépasser 300 cm. (cartes 4 et 5).

12 - Réserve en eau facilement utilisable (R.F.U.)

La réserve facilement utilisable en eau correspond à la partie de la réserve en eau utile facilement absorbable par les plantes. Quand cette limite est atteinte le végétal voit sa croissance se stopper et débute alors son flétrissement temporaire car réversible.

Ce seuil est appelé humidité au point de flétrissement temporaire. Il dépend pour une grande partie du végétal.

Sur sol sableux (Site n ° 800) la réserve en eau facilement utilisable atteint des valeurs d'autant plus importantes que le végétal est plus résistant à la sécheresse. (VALET Avril 1980) (Graphique 6).

On constate que des valeurs de R.F.U. :

- représentent en moyenne 30 - 35 % de la réserve en eau utile (R.U.) pour le blé et le maïs sur 2 mètres et 75 % pour le mil le sorgho et le niébé sur 3 mètres :

Cette part diminue rapidement avec la profondeur pour les maïs et blé de 60 à 20 % de 50 à 200 cm mais reste assez semblable pour les mils, sorghos et niébés, 75 à 50 % de 50 à 300 cm.

Ces valeurs voisinent et complètent aussi celles déterminées par d'autres auteurs :

- R.F.U. du riz et du maïs égale à 1/3 de R.U. (DANCETTE 1977) ;
- R.F.U. du sorgho égale à 78 % de la R.U. (KALMS - VALET 1975) ;
- R.F.U. de la canne à sucre et du coton égales à 70 % de la R.U. (KALMS et VALET 1975) (VALET 1976).

En culture irriguée la profondeur utile de sol varie de 50 cm pour les oignons et tomates (BRGM - GERDAT 1979) 80-120 pour le sorgho, le coton et l'arachide à Lossa (VALET - MICHAUX 1979) et le niébé et le blé à Tillabéry (VALET - ALBERT 1976) et jusqu'à 1.50 m 0 1.80 m pour le mil, sorgho et coton à Tillabéry (KALMS - VALET 1975) sur des sols plus perméables.

La connaissance des R.F.U. et des exigences hydriques spécifiques des plantes permettent dans le cas de pilotage de l'irrigation le calcul des doses et des fréquences d'irrigation moins importantes mais plus rapprochées évidemment pour les cultures les moins résistantes à la sécheresse (VALET - ALBERT 1976) VALET 1980 - CHARROY 1971 - DANCETTE 1977 - CHARROY - FOREST - LEGOUPIL 1978).

Irrigation : bihebdomadaire : maraîchage, riz, oignon et piment.
hebdomadaire : sésame, maïs, blé, canne à sucre
(boom - stage)
décadaire : canne à sucre et arachide.
bi-mensuelle : sorgho, coton, mil et niébé.

**TABEAU 21 : RESERVE EN EAU UTILE (R.U.) EXPRIMEE EN MM POUR
DES TRANCHES DE SOL DE 50 CM**

Catégo- ries	Sites	R.U. en mm				Importance sur	
		0-50 cm	50-100 cm	100-150 cm	150-200 cm	0-100 cm	0-200 cm
I	801	102 (1)	Horizons non humectés			102	-
	803	103 (1)	"			103	-
	807	77 (1)	"			77	-
	810	105	"			105	-
	811	80	"			80	-
	816	79 (2)	"			79	-
	817	90	"			90	-
	818	84	"			84	-
	819	103	"			103	-
II	802	83	53	37		136	173
	812	53	52	30 (4)		103	133 (4)
	813	36	30	24 (4)		66	90 (4)
	814	41	42	18 (4)		83	101 (4)
III	815	61	(3)	-	-	+ 61	+++ (3)
	805	67	50	32	9 (5)	117	158 (5)
	806	59	57	41	-	116	
IV	809	69	32	20	-	101	-
	804	45	32	8 (3)	-	77	-
	808	60	38	17	18	98	133
V	800	38	27	23	24	65	112

NOTA : (1) sur 40 cm

(2) sur 35 cm

(3) nappe phréatique

(4) sur 130 cm

(5) sur 150 - 180 cm.

13 - Micro et macroporosité

La porosité totale ne rend pas compte des phénomènes de circulation des fluides ni de stockage de l'eau. Il est donc nécessaire de procéder à la caractérisation de types de porosités liées sinon à des formes de pores du moins à des tailles. C'est ainsi que la méthodologie utilisée permet de définir deux types de porosités qui interviennent aussi bien dans la pédogénèse que dans l'agronomie :

- microporosité ;
- macroporosité.

La microporosité correspond à la porosité capillaire (DOJARENKO 1924), c'est donc le volume occupé par l'humidité à la capacité de rétention au champ, pour des pores inférieures à 3μ (HENIN 1977) ou à 8μ (DUCHAUFOR 1970). Encore appelée porosité de rétention (BRYSSINE) elle est donc inférieure ou égale au diamètre de rayon d'action capillaire. Elle ne dépend pas uniquement de la dimension des pores (KATCHINSKY) mais, en réalité de la portion des espaces lacunaires fins occupés par les différentes catégories d'eau (BRYSSINE 1965).

Elle est définie également comme la porosité ouverte ou porosité effective (GRAS 1965).

La macroporosité ou porosité non capillaire (KVASNIVOFF 1927), ou capacité minimum pour l'air (HENIN 1977) ou porosité d'aération (BRYSSINE 1965) correspond donc aux pores de diamètre supérieur soit à 3μ soit à 8μ .

Ces deux porosités ont pu être mesurées pour les sols des périmètres après humectation, donc remplissage des vides.

L'humidité à la saturation apparente permet de calculer la porosité maximum dans les conditions de l'expérimentation. Cette porosité est toujours inférieure à la porosité totale déterminée à partir des densités réelles et apparentes (Tableaux 15).

La valeur de cette porosité maxi, de saturation apparente par rapport à la porosité totale a tendance à décroître des sols des catégories I à V et pour chaque sol avec la profondeur en passant par un minimum dans l'horizon 60 - 100 cm.

TABLEAU 22 : POROSITE MAXI EN % DE POROSITE TOTALE :

Catégorie	0-50 cm	60-100 cm	110-150 cm	160-200
I	93	-	-	-
II	81	64	60	-
III	79	72	79	64
IV	73	64	71	68 (1)
V (1)	82	72	66	62

(Moyenne des valeurs des sols sauf (1) : un seul échantillon).

La cause est à rechercher dans la difficulté en pratique de saturer le sol sans piéger de l'air sur une grande profondeur (ORLOB et RADHAKRISNA - 1958) et ce surtout pour les sols possédant une macroporosité un peu plus élevée. Il se peut également qu'une partie de la porosité soit "fermée", donc inaccessible au fluide (GRAS 1965).

La macroporosité représente une fraction de la porosité totale. Elle augmente de la première à la cinquième catégorie, assurant ainsi une meilleure aération et favorisant une meilleure circulation des fluides. Pour chaque sol elle diminue avec la profondeur en dessous de 40 - 50 cm, et ce plus fortement pour les sols les plus perméables à l'exception des sols sableux où elle reste constante sur l'ensemble du profil.

TABLEAU 23 : MOYENNES DES MACROPOROSITES

Catégories	Tranches de sol en cm			
	0-50	60-100	110-150	160-200
I	10.7	-	-	-
II	19.2	19.7	17.5**	-
III	18.6	15.0	13.4***	12.2*
IV*	19.4	12.3	9.8	8.9
V*	27.6	30.0	30.8	30.4

* 1 seul échantillon

** 2 échantillons

*** 3 échantillons.

3 groupes s'individualisent nettement pour la tranche de sol de 50 cm et même encore sur 1 mètre :

- . Macroporosité < 10 : catégorie I
- . Macroporosité entre 11 et 20 : catégorie II, III et IV.
- . Macroporosité > 20/25 : catégorie V.

La microporosité, ou volume d'eau retenue et disponible pour les cultures, diminue des sols les plus imperméables aux sols les plus perméables. Elle a tendance à être constante sur 150 cm ou légèrement plus élevée pour les sols des catégories, III et IV mais plus basse pour les sols de la catégorie V. (Tableau 15).

TABLEAU 24 : MOYENNE DES MICROPOROSITES

Catégories	Tranches de sol en cm			
	0-50	60-100	110-150	160-200
I	26.1	-	-	-
II	16.5	16.9	17.6**	-
III	19.1	24.0	26.1***	17.4*
IV*	17.8	18.5	20.4	15.9
V*	10.4	8.6	7.2	8.3

* 1 échantillon.

** 2 échantillons.

*** 3 échantillons.

Les valeurs se regroupent en trois comme précédemment :

- . Microporosité > 25 : catégorie I.
- . Microporosité entre 20 et 15 : catégorie II, III, IV.
- . Microporosité < 15/12 : catégorie V.

BRYSSINE distingue deux caractères essentiels de la porosité :

- . Son importance.
- . Sa nature.

Son importance désigne la valeur totale des espaces lacunaires.

La porosité totale est basse si elle est inférieure à 40 %, (classée 3) et moyenne pour des valeurs comprises entre 40 et 60 % (classée 2).

Sa nature définit la grosseur des pores individuels et est traduite par le rapport Macroporosité/Microporosité.

Le sol sera :

- a - compact non poreux pour des valeurs $< 0.4/0.7$.
- b - peu compact, peu poreux pour des valeurs comprises entre 0.4 et 1.0.
- c - poreux pour des valeurs $> 1.0/1.5$.

Les sols des terrasses apparaissent donc comme ayant une porosité totale basse, de classe 3 à l'exception d'un seul horizon 60 - 100 cm du site 811. (Tableau 15).

Le deuxième caractère rend compte de la tendance à l'asphyxie des sols des deux périmètres (VIGNERON et DESAUNETTES 1958).

- sols compacts, non poreux à risque d'asphyxie total et permanente.

Catégorie I (a)

- sols peu compacts et peu poreux à risque d'asphyxie partielle et décroissant avec la teneur en éléments sableux et la densité apparente.

Catégorie II, III, IV (b,c/a).

- sols encore assez compacts, poreux sans risque d'asphyxie.

Catégorie V (c).

La présence de taches, de trainées jaunâtres et blanches, et de concrétions d'oxyde fer et de manganèse dans les profils de la plus part des sols de catégories I à IV souligne bien cette tendance à la stagnation, à l'engorgement et à l'asphyxie racinaire qui résulte de ces faibles porosités. La faiblesse de la capacité pour l'air est un facteur limitant l'installation ou le développement de nombreuses plantes cultivées.

14 - Prises en masse :

La compacité des sols des terrasses et glacis qui a comme corrolaire une forte diminution du volume total des vides, donc une faible porosité totale traduit la disposition serrée des particules élémentaires.

Elle s'oppose à une disposition lâche qui souligne un bon ameublissement. A cette compacité s'ajoute un durcissement saisonnier appelé prise en masse.

Elle est étroitement dépendante des rythmes et durées pluviométriques. Elle diminue avec l'humectation du sol puis augmente avec leur dessèchement (NICOU 1974 - VALET 1980).

La détermination de cette prise en masse se fait entre autre par la mesure de la résistance à la pénétration d'une tige métallique de 2 cm de diamètre sur 50 cm de profondeur. Le travail dépensé rend compte ainsi du degré de prise en masse des sols. Les causes de cette caractéristique mécanique des sols des zones tropicales et sahélienne ne sont pas encore totalement élucidées.

Le piétinement des bovins et les feux de brousse qui réduisent la vie biologique et raréfient la matière organique (HURAULT 1971) n'interviennent pas à Lossa.

La prise en masse, ici, comme au Sénégal (NICOU 1974) s'accroît quand :

- la teneur soit en sables très fins pour les sols sableux, soit en argile à dominance montmorillonitique pour les sols argileux : augmente,
- la vitesse de ressuyage diminue,
- la densité apparente sèche augmente au cours de l'hivernage et avec la teneur en sable et en argile,
- la teneur en sodium échangeable du complexe absorbant augmente de 10 à 25 % de la somme totale des bases échangeables,
- la teneur en matière organique diminue,
- l'indice de compacité, reflet de la macroporosité diminue,
- le taux de gonflement augmente.

(NICOU 1971 - CHARREAU - NICOU 1971 - VALET 1980).

D'autres causes sont à vérifier, comme le rôle de la silice, du fer, de l'aluminium et du calcium, associés aussi à la matière organique, éléments qui entrent dans la composition des ciments de type Portland (IRAT information 1978). Toutefois à Lossa cette prise en masse ne serait pas due à une cimentation (GAVAUD 1977).

Les contraintes qu'entraînent cette prise en masse sont sévères sur le plan agronomique car :

- elle interdit tout travail du sol en sec,
- elle oblige à l'utilisation de force de traction élevée,

- elle a un rôle néfaste sur la germination (résistance, diminution de l'aération, pourrissement) entraînant une mauvaise levée plus tardive (BRYSSINE 1959 - ROSSET 1978 - MICHAUX 1979 - VALET 1980),
- une forte diminution de l'enracinement en profondeur et de la densité racinaire de la canne à sucre (VALET 1973-1976),
- un écrasement racinaire important (VALET 1973).
- une forte diminution de la production végétale de la canne à sucre, tomate et coton pour des résistances supérieures à 100 kg.m, sur 50 cm (VALET - MICHAUX 1979, VALET 1976, VALET 1980).

Les résultats de quelques tests de pénétrométrie réalisés sur des sols à Lossa vérifient les lois déterminées sur les sols sableux du Sénégal et ceux des terrasses de Tillabéry.

Les sols des cuvettes lourdes et/ou sodiques nécessitent un travail supérieur à 130 et atteignant 230 kg.m.

Les sols à pseudogley moins durcis obligent à la dépense de 100 kg.m environ. Par contre le travail dépensé diminue considérablement en sol brun et avec l'allègement de la texture. Il n'est plus respectivement que de 80 et 20 kg.m environ. (Tableau 25).

La correction de cette propriété, pour l'obtention d'un ameublissement satisfaisant, nécessite :

- l'enfouissement périodique de matière verte riche en polysaccharides favorisant la stabilité structurale (CHARREAU - NICOU 1971 - IRAT information 1978).
- le labour profond assurant outre une meilleure fracturation du profil cultural, une macroporosité plus élevée favorisant le ressuage et l'économie de l'eau, la vitesse et la densité racinaire et la levée. (NICOU - CHOPPART).
- le sous-solage profond (CHARREAU - NICOU 1971 - VALET 1976).

Il est à remarquer toutefois que dans les sols les plus compacts et durcis, également riches en sodium, le sous-solage n'assure pas un ameublissement suffisant pour permettre leur mise en culture malgré des augmentations relatives de production spectaculaires mais encore faibles pour être économiquement intéressantes. Le travail nécessaire à la pénétration reste en effet encore supérieur à 100 kg.m. Pour les sols moins compacts ce dernier s'abaisse à 60/40 kg.m (Tableau 25).

TABLEAU 25 : RESISTANCE A LA PENETRATION D'UNE TIGE DE DIAMETRE 2 cm (Février 1980)

Types de sol	Symboles		Traitements (3) .non sous- solé 0 .sous solé 1	Travail en kg.m aux profondeurs en cm					Améliora- tion en % due au sous-solage
	(1)	(2)		10	20	30	40	50	
1. Sol brun subaride hydromorphe à faciès halomorphe.	9	7	0 0 0 0 1	3 8 10 3 2	12 25 41 5 4	35 60 59 44 40	65 120 88 100 80	130 215 230 190 120	37
2. Sol brun subaride à pseudogley	6	5	0 0 1	8 3 2	24 20 4	39 50 4	55 90 21	80 170 35	72
3. Sol brun subaride à pseudogley	7	5	0 1	3 10	22 15	45 21	70 30	110 40	64
4. Sol brun subaride argilo- sableux	14	2	0 1	2 7	3 15	20 30	52 42	85 68	20
5. Sol brun subaride sablo- argileux	6	9	0 0	2 2	4 5	7 9	9 14	18 20	

NOTA : (1) Symbole F. EAU
(2) Symbole C. EISNA
(3) Le sous-solage a été réalisé en mars 1979 sur 40/60 cm de profondeur et 1 m d'écartement dans le sens de la pente.

Moyenne de 5 essais réalisés en sec.

IV - DISCUSSION - APTITUDE A L'IRRIGATION DES SOLS

Les résultats ont déjà fait apparaître un certain regroupement et classement des sols des terrasses et glacis. Classement qui résulte des conditions pédogénétiques et des caractères géo-pédologiques de ces sols. Il est important donc de vérifier quelles sont les lois qui régissent leur comportement physique et hydrologique, de déterminer quels sont les facteurs pédologiques discriminants les propriétés hydriques et hydrologiques, leur seuil et éventuellement de les hiérarchiser. Ceci aura pour résultat de guider les futures prospections hydropédologiques en ne retenant que le maximum d'analyses, d'observations à faire selon le type de sol et de prévoir son comportement hydrologique et ainsi la manière de l'équiper pour le mettre en valeur le plus rationnellement possible, donc le plus économiquement.

1 - Influence de la texture :

Comme l'a défini HENIN (1976) "l'expression texture renseigne sur la taille prédominante ou la gamme des particules du sol qualitativement et quantitativement".

Elle représente ainsi les constituants physiques du sol dans leurs rapports entre eux en assemblage différents selon leur origine géologique et leur pédogénèse spécifique. Dans la texture c'est la classe argileuse qui régit le plus grand nombre de propriétés physiques et hydriques.

Ainsi avec l'augmentation de la teneur en argile de l'horizon 0 - 60 cm donc de la surface spécifique et de l'importance du taux de gonflement. On peut observer :

On peut observer :

- 1°/ - une diminution des vitesses d'infiltration apparente (G7) et du front d'humectation.

En ce qui concerne la vitesse d'infiltration apparente, la vitesse constante diminue exponentiellement donc très rapidement de 30 à 5 cm/h lorsque la teneur en argile atteint 10 %, à 20 % elle n'est plus que de 1 cm/h puis ensuite elle atteint des valeurs très faibles.

Les vitesses moyennes sur 2 heures en sol sec et en sol humide se comportent de même mais restent nettement supérieures ce, surtout en sol sec (Tableau suivant) :

Argile %	Vitesses cm/h		
	Moyenne sur 2 heures		Constantes
	Sol sec	Sol humide	
10	9	26	5
20	3	7	1
30	1.2	3	0.2

Les phénomènes de gonflement tendent à retrécir, sinon fermer les voies d'accès et ainsi le débit.

En introduisant la moitié de la teneur en limons totaux on ne modifie en rien la liaison.- vitesse d'infiltration. (G8)

Quant à la vitesse de progression du front d'humectation mesurée à - 30, - 50 et - 100 cm de profondeur on observe une plus grande variabilité dans la liaison. Deux populations de points s'individualisent :

- un nuage très lâche pour les vitesses à - 30 et - 50 cm ;
- une liaison plus serrée pour la vitesse à - 100 cm.
(Graphe 10).

La progression du front d'humectation dépend aussi apparemment de la densité apparente puisque les plus fortes valeurs correspondent aux plus faibles densités donc aux plus fortes porosités totales. (Graphe 9).

% argile	Vitesses à	
	- 30/50 cm	- 100 cm
10	110.0	7.5
20	25.0	3.5
30	3.0	1.5

Les limons ne modifient en rien cette liaison. Ils jouent donc un rôle voisin de celui de l'argile (G11).

2°/ - une augmentation de la capacité de rétention in situ (C.R.) et de la réserve en eau utile (R.U.).

Comme cela a été remarqué (FEODOROFF et BALLIF 1962, HILLEL 1974) la capacité croît donc avec l'augmentation de la surface spécifique des constituants physiques du sol assurant la fixation par absorption d'un plus grand nombre de molécules d'eau.

Cette croissance est toutefois exponentielle et n'est plus qu'imperceptible à partir de 38/40 % d'argile pour cesser, vers 45 %. (G12).

Quelques points supplémentaires d'argile en sols sableux entraînent une augmentation de la capacité de rétention plus forte qu'en sols argileux.

Il est reconnu que la réserve en eau utile mesurée "in situ" est influencée favorablement par la teneur en éléments fins (GAVAUD 1968, WILLAINE, OSMAN, GRAS 1971) mais cette croissance si elle apparaît linéaire comme pour la C.R. pour les sols des terrasses dans le cas de valeurs obtenues en laboratoire (SOGETHA 1969), elle est à croissance de type parabolique, mais moins nettement que cela a été observé sur les terrasses à Tillabéry (VALET 1974). Le maximum est atteint pour des valeurs de 38 à 40 % d'argile. (G13).

Il apparaît pour la capacité de rétention comme pour la réserve en eau utile certaines influences d'origines texturales, physiques, hydrologiques et chimiques. Cette dernière sera étudiée plus loin.

Certaines valeurs excessives de C.R. s'individualisent correspondant.

- . soit à des horizons plus fortement chargés en limons (> 10 %).
- . soit à des zones au-dessus de nappes phréatiques et soumises à la frange capillaire.

Valeurs de C.R. (G12)		
Argile (%)	C.R. (mm)	R.U. (mm)
38	100	100
40	150	150
45	200	200
50	250	250
55	300	300
60	350	350
65	400	400
70	450	450
75	500	500
80	550	550
85	600	600
90	650	650
95	700	700
100	750	750

Des valeurs plus faibles regroupent :

- . soit des horizons dont la densité apparente est plus élevée et supérieure à 1.70.
- . soit des horizons de surface qui ont pu être mal isolés et ainsi soumis à l'évaporation.

Pour la réserve utile les mêmes observations sont à faire à l'exception des horizons à frange capillaire dont la réserve en eau apparaît contrairement inférieure.

Des phénomènes de gonflement, de difficulté de mouillabilité, de porosité fermée et faible d'emprisonnement d'air, d'irrégularité des pores, d'anisotropie et d'hétérogénéité spatiale (HUMBEL 1975) expliquent fort bien qu'il n'y ait pas proportionnalité entre la capacité de rétention et la teneur en argile comme aussi la réserve en eau puisse décroître, à partir d'un certain seuil argileux. (MONNIER - HILLEL 1974).

Les courbes de capacité de rétention et de réserve en eau utile par rapport à la teneur en argile apparaissent décalées pour des valeurs de densités apparentes inférieures ou supérieures à 1.70 (Graphes 12 et 13).

L'effet d'un sous-solage améliorera ces propriétés hydriques et valorisera l'argile, en abaissant par fracturation la densité apparente. (VALET 1976 - 1978). Dans le graphique cité ci-dessus G13 cette amélioration est indiquée par les sens de la flèche.

L'argile commande la microporosité qui est une porosité d'origine texturale.

La répartition spatiale de l'argile dans le paysage est régit par la pédogénèse. La texture et le régime hydrique apparaissent donc comme topographiquement liés (GAVAUD 1977) et l'on observe que le sol s'assombrit du sommet au bas des pentes (ST AMAND) avec la diminution de la perméabilité. C'est ainsi que la vitesse de progression du front d'humectation augmente avec la composante rouge des sols :

Couleur (1)	Vitesse de progression du front d'humectation
2.5 Y	0 à 55 cm/h
10 YR	0 à 92 cm/h (83 % d'horizons ont une vitesse < 20 cm/h)
7.5 YR	2 à 177 cm/h)
5 YR	3 à 120 cm/h)
) échantillons bien répartis (Graphe 14)

(1) sur échantillons humides.

Il en résulte que la texture va avoir une action importante dans la pédogénèse car "elle maintient la perméabilité à des niveaux qui limitent et fixent l'évolution des sols" (GAVAUD 1969) mais aussi en assurant des capacités de rétention différentes. Elle règlera aussi la profondeur humectée de sol en l'absence de tout accident pédologique ou lithologique bloquant la pénétration de l'eau.

Pour des niveaux de probabilité pluviométrique donnés, la position du front d'humectation, en sol cultivé, varie avec la texture (CHARROY-FOREST-LEGOUPIL 1978).

SONA : Position du front d'humectation au 15 août (en cm)

Types de sol	qf	\bar{m}	qf	Maxi
Sol hydromorphe	24	32	50	53
Sol brun	28	39	58	110
Sol sableux	50	90	120	200

(L'analyse fréquentielle a porté sur 48 années : 1930-1977).

La médiane (probabilité 50 %) fixe de façon sommaire les limites d'enracinement offertes aux cultures dans les conditions pluviométriques de SONA.

L'irrigation va entraîner, dans la mesure où elle va profondément perturber les conditions d'humectation, une augmentation et de la profondeur d'humectation et de sa durée mais aussi des volumes d'eau en circulation dans le solum qui pourront modifier considérablement la pédogénèse actuelle.

Précisons qu'avec l'insolation intense auxquels sont soumis les sols, un dessèchement superficiel se produit qui se poursuit d'autant plus profondément et intensément que la microporosité est plus élevée avec un débit faible et bas certes mais prolongé dans le temps et que n'arrête aucune rupture capillaire (Hallaire-Henin 1958).

C'est ainsi que les sols les plus argileux et/ou à plus forte microporosité (801 - 803 - 807) présentent des profils d'humidité minimum inférieurs à ceux déterminés à pF 4.2 (Graphe 15).

2 - Influence de la structure :

Les sols des terrasses sont apparus comme mal structurés, faiblement fissurés, instables, compacts et résistants à la pénétration. L'ensemble de ces propriétés résultent des conditions pétrographiques mais surtout des conditions édaphiques et climatiques.

Malgré une très forte condensation des sols sahéliens, resserrement de l'assemblage de la matière (HUMBEL 1975), la porosité totale est toujours supérieure à la porosité texturale, car ces sols présentent une certaine association structurale et une fissuration encore plus ou moins développée.

Cette condensation favorise aussi la dessiccation permise par le climat mais jusqu'à la limite de la porosité texturale s'il n'y a pas d'évolution vers des espèces minérales plus dense (FIES, MONNIER, HENIN 1972).

La macroporosité, reflet d'un certain état d'agrégation et/ou de fissuration du matériaux, même si elle ne participe pas dans sa totalité à l'écoulement (GRAS 1965 - HUMBEL 1975) règle la perméabilité et l'infiltration de la phase liquide et gazeuse, comme sa redistribution dans le profil.

Il est à noter toutefois qu'avec la profondeur, la structure est de moins en moins développée et souvent de plus en plus instable se manifestant par une forte baisse de la macroporosité (tableaux 10, 11, 15). La valeur de la porosité totale tend alors vers celle de la porosité texturale.

C'est ainsi que lorsque la macroporosité dépasse 12 % environ les vitesses d'infiltration apparentes et de progression du front d'humectation atteignent 1 cm/h et augmentent ensuite rapidement ; à 15 % les vitesses sont de 2 cm/h et à 20 % de 12 cm/h. Le point de rupture entre la progression lente et rapide de ces vitesses se situe vers une valeur de la macroporosité de 16/12 %.

La structure et son degré d'instabilité qui commande sa dégradation interviennent dans la rétention en eau (FEODOROFF 1961) et par voie de conséquence dans la réserve utile en eau qu'elle peut fortement influencer.

Dans les sols de catégorie I la présence à faible profondeur d'un horizon imperméable stoppe la redistribution de l'eau dans le profil et augmente la capacité de rétention "in situ".

L'instabilité des sols des périmètres est due à la présence d'ion sodium fixé sur le complexe absorbant. La liaison effective entre la teneur en sodium et les valeurs de l'instabilité structurale a été évoquée (cf paragraphe 2.2).

Pour des valeurs d'instabilité structurale supérieure à 5 les vitesses d'infiltration apparente et celles d'avancement du front d'humectation diminuent rapidement et s'annulent lorsqu'elles atteignent 7.5.

La croissance moins que proportionnelle de la capacité de rétention et la décroissance observée à un fort taux d'argile peuvent s'expliquer par la présence de ces ions dont l'action est déflocculante et limite la circulation de l'eau.

La réserve en eau utile est elle-même affectée par l'instabilité structurale. Dans le graphique cette instabilité, mesurée d'après la méthode HENIN, entraîne en augmentant des baisses de cette réserve utile. (G 17).

Quatre populations apparaissent, correspondant à des classes texturales différentes, mais évoluant semblablement.

- I - horizons à teneur en argile < 4 %
- II - horizons à teneur en argile de 4 à 32 %
- III - mais avec influence des densités apparentes
- IV - horizons à teneur en argile > 32 %

Dans ce graphique apparaît bien aussi une augmentation de l'instabilité structurale avec celle de la teneur en argile.

Il a été remarqué (GREEN 1948 - MONNIER 1973) que pour les teneurs de 5 % de Na⁺ échangeable du complexe on observait un basculement de la filtration et qu'à 7.5 % le phénomène était irréversible. De même que pour des valeurs de Is supérieures à 5 la stabilité était défavorable et le sous-solage inopérant. Or sur le périmètre nombreux sont les sols dont l'ensemble du solum ou dont les horizons profonds à très profonds présentent des valeurs qui atteignent et même dépassent ces seuils (Tableau 11).

Contrairement à ce qui avait été énoncé (SOGETHA 1969), c'est aussi au niveau du faciès que se fait la discrimination hydro-pédologique et non à celui seul du groupe ou sous-groupe (VALET 1974 et 1980). Car au sein de ces unités pédologiques apparaissent des caractères particuliers exprimant des processus pédologiques secondaires retenus au niveau du faciès mais qui influencent tout le comportement hydrologique de ces sols et jouent un rôle primordial (limitant ou non) sur leur mise en valeur.

3 - Aptitude des sols à l'irrigation :

A la suite des études, l'analyse des contraintes d'origines édaphiques, liées au sol et au climat, pédo-géomorphologiques, liées au modelé et à la morphogénèse, laissent apparaître que les sols peuvent se regrouper en 5 catégories dont le comportement hydrologique est bien spécifique.

Pour chacune de ces classes il est possible de faire des propositions d'affectation hydro-agricole compte tenu des possibilités techniques et/ou économique d'amélioration foncière pour certaines.

3 - 1 <u>Catégorie I</u>	Superficie : ha	SONA	LOSSA
		39.5	27.2
	%	50.6	29.3

Dans cette catégorie on retrouve des sols appartenant à des groupes différents :

- . vertisols (803)
- . sols hydromorphes à pseudogley (801, 810, 817, 818, 819)
- . sols hydromorphes à amphigley - (816)
- . sols à pseudogley (807).

Ils présentent des textures variables de limono-argilo-sableuse (807) à argileuse lourde (803). Mais ils ont en commun d'être situés en une même unité de paysage, la cuvette, d'être compacts à très compacts, à densité apparente très forte (1.65 en surface et augmentant jusqu'à 1.70 vers 40 cm et même 2.0) de posséder de fortes teneurs en sodium échangeable que compensent mal les teneurs en calcium et en calcaire actif présent dans le profil, et qui expliquent les fortes instabilités structurales mesurées (sur 0-50 cm, 3 à 5 pour les sites 811, 816, 817, 819 et plus de 5 pour les sites 801, 803, 807 et 810) et une structure lamellaire (803) à massive (801, 807, 810, 816, 817 et 819) dès 10/25 cm de profondeur, d'avoir une profondeur utile très faible 35/50 cm pour les sites 801, 803, 807, 816, 810 et faibles 70/80 cm pour les sites 811, 817, 818, 819. (profondeurs atteintes par les fentes de retrait) et des microporosités de 26 % (soit 70 % de la porosité totale) et des macroporosités de 10 %.

La limitation de la profondeur humectée résulte de l'imperméabilité de l'horizon sous-jacent soit par forte teneur en argile, en sodium et forte densité apparente et compacité élevée qui jouent seules ou conjointement.

La vitesse d'infiltration apparente est très faible et s'annule rapidement de même que celle de progression du front d'humectation.

Les propriétés hydrauliques peuvent se résumer à :

- perméabilité faible à nulle ;
- distribution de l'eau dans la masse du sol très lente ;
- faible porosité totale (< 35 %) ;
- forte compacité et microporosité avec tendance à l'engorgement ;
- les risques d'asphyxie totale et permanente sont réels ;
- valeur de la capacité de rétention surévaluée par manque de ressuyage ;
- réserve en eau utile importante, mais sur 35 cm à 80 cm donc fortement soumise à l'évaporation et fortement exploitée par les cultures, entraînant des successions rapides d'engorgement et de dessèchement préjudiciables au développement végétatif du coton, canne à sucre et tomate (VALET - MICHAUX 1979 - VALET 1976).

Ces sols sont inaptes à la culture irriguée de plantes à enracinement profond et vigoureux.

Ils nécessitent la mise en place de travaux coûteux d'amélioration foncière tel que le sous-solage croisé, labour profond, le drainage et même l'apport d'amendement gypseux afin d'assurer la pérennité de l'effet de ces travaux après élimination du sodium.

Mais de tels travaux ne peuvent être remboursés que par des cultures riches à faible enracinement dont la production optimum peut cependant ne pas être obtenue.

L'irrigation devra être conduite avec prudence et suffisamment fractionnée pour être maintenue à un taux inférieur à la capacité de rétention afin d'éviter toute stagnation et engorgement car ils ont une faible capacité pour l'air. Des binages fréquents doivent être envisagés pour fracturer la croûte qui se forme après chaque apport d'eau, et gêne la germination, la levée et l'infiltration.

Remarquons qu'à SONA ces sols sont assez bien groupés et forment une large bande qui traverse tout le périmètre en son centre ; alors qu'à LOSSA, en dehors du kori à l'Est, ces sols sont très disséminés en taches plus ou moins allongées dans le sens de la pente et, sauf très rarement, ne constituent qu'une faible partie d'un casier. Leur drainage par drains enterrés s'avérera dans ce cas excessivement coûteux.

L'apport de l'engrais vert, canne à sucre qui sur ces sols peut avoir une production de 20 à 40 t/ha, d'engrais acidifiant, sulfate d'ammoniaque, phosphate super simple et chlorure de potasse sont à recommander.

Devant le coût prohibitif vraisemblablement de l'amélioration de ces sols et peut-être une assez faible pérennité, car les instabilités structurales sont élevées (> 5), il paraît préférable d'envisager d'y réaliser la riziculture en semi-submersion pour maintenir le sol toujours boueux. Il faut éviter de trop grandes et fréquentes alternances d'engorgement de sécheresse du sol. (La réserve en eau facilement utilisable du riz est de 30 % environ de la réserve en eau utile).

3 - 2 Catégorie II :

	<u>SONA</u>	<u>LOSSA</u>
Superficie : ha	29.5	4.0
%	37.7	4.5

Dans cette catégorie se retrouvent principalement les sols de type brun-rouge développés uniquement sur bourrelets sableux (802, 811, 812, 813, 814).

La texture varie, sur 0-60 cm, de sablo-limoneuse (site 812) à argilo-limono-sableuse (811). Leur structure est assez mal développée en surface (0-20 cm), cubique, pour le 802 mais correcte pour les autres (polyédriques) mais elle passe à massive (802) et à prismatique en dessous. Ils sont compacts mais avec une porosité totale (33 à 36 %) et macroporosité (19 %) un peu plus élevés que ceux de la catégorie précédente, correspondant à des densités apparentes de 1.67 à 1.73 environ. Ces caractères physiques assez défavorables, que la texture initialement n'induisait pas, s'explique par la présence, encore dans ces sols, de sel de sodium, et ce dès la surface. Le résultat en est donc aussi une forte instabilité structurale (IS:3 à 5) qu'accusent peut-être des teneurs en limons non négligeables.

La conséquence sur les propriétés hydriques et hydrodynamiques est importante et bien sûr défavorable :

- les vitesses d'infiltration apparentes et de progression du front d'humectation sont faibles à modérément lentes ;
- la profondeur de sol utile, humectable, est plus élevée et atteint 1 m 30/1 m 50 environ mais plus quand l'horizon sous-jacent est sableux (site 802) ;
- le temps mis par l'eau pour se redistribuer dans le profil sec jusqu'à 100 cm est lent. Ce temps peut varier de 4 heures (812) pour le sol le moins argileux et limoneux à 16/50 heures pour les autres ;
- la capacité de rétention est moyenne et là encore dépend de la texture ;
- les réserves en eau utile varient de 100 à 170 mm sur deux mètres et peuvent être considérées comme satisfaisantes ;
- le risque d'asphyxie partielle est temporaire mais existe ; il décroît avec la teneur en argile et en limons.

Ces sols quoique moins défavorables que les précédents nécessitent pour leur mise en valeur des traitements identiques qui certes valoriseront mieux les rendements.

- sous-solage profond dans le sens de la pente.
- labour profond, croisé.
- passage fréquent de dent.
- apports d'engrais verts et chimiques acidifiants.

L'apport de gypse peut être évité à condition de bien lessiver les horizons de surface.

Ce sol convient à toute culture. La canne à sucre qui nécessite une période d'assèchement lors de sa maturation pour concentrer son sucre est à bannir des sols à nappe.

3 - 4 Catégorie IV :

superficie : ha	LOSSA
%	12.7
	13.5

Ces sols de cette catégorie sont identiques :

- . sols peu évolués d'apport éolien rouge (808).
- . sols peu évolués d'apport éolien jaune (809).

Ces sols de recouvrement ont une épaisseur variable 60 à 120 cm, reposant sur des pédons d'origine ancienne ou sur l'altérite. De sable limoneux et limon-sableux mais sablo-argileux (809) sur 70 cm environ leur texture s'enrichit en argile et en limons (808) avec la profondeur pour devenir sablo-argileuse puis redevient sablo-limoneuse dans l'altérite. Les sols jaunes sont toujours chargés en argile et en limon. Cette différence texturale a pour conséquence d'assurer une meilleure structure à chaque horizon. Les porosités totales sont de 37 % dans les horizons de recouvrement les plus légers mais tombent à 30 % dans les horizons profonds. Si ces sols sont peu compacts ils sont peu poreux. Le sol 809 est exempt de sodium mais le 808 présente des teneurs, à partir de 50 cm environ dans les horizons recouverts, suffisantes pour que l'indice d'instabilité structurale dépasse 2 et atteigne 3.5 vers 100 cm.

Il faut remarquer que le site 808 présente des caractéristiques hydrodynamiques (vitesses d'infiltration et du front d'humectation) qui le rattache à la 5e catégorie mais des caractéristiques hydriques (capacité de rétention et réserve en eau utile) qui le place dans cette catégorie. Les caractéristiques hydrodynamiques du site 809 le placeraient en 3e catégorie.

En fait ces sols ne présentent pas de facteurs physiques ni hydrologiques limitants.

- vitesses d'infiltration apparente et de progression du front d'humectation bonnes.
- l'aération du profil est encore assez moyenne et malgré une perméabilité satisfaisante des risques d'asphyxie peuvent apparaître dans le site 809 où l'on remarque des taches rougeâtres.
- la réserve en eau est moyenne puisqu'elle est de 100 mm sur 1 mètre mais seulement de 20 mm environ par tranche de 50 cm en dessous.

Ce sol convient à toute culture. La canne à sucre qui nécessite une période d'assèchement lors de sa maturation pour concentrer son sucre est à bannir des sols à nappe.

3 - 4 Catégorie IV :

superficie :	ha	LOSSA
	%	12.7
		13.5

Ces sols de cette catégorie sont identiques :

- . sols peu évolués d'apport éolien rouge (808).
- . sols peu évolués d'apport éolien jaune (809).

Ces sols de recouvrement ont une épaisseur variable 60 à 120 cm, reposant sur des pédons d'origine ancienne ou sur l'altérite. De sable limoneux et limon-sableux mais sablo-argileux (809) sur 70 cm environ leur texture s'enrichit en argile et en limons (808) avec la profondeur pour devenir sablo-argileuse puis redevient sablo-limoneuse dans l'altérite. Les sols jaunes sont toujours chargés en argile et en limon. Cette différence texturale a pour conséquence d'assurer une meilleure structure à chaque horizon. Les porosités totales sont de 37 % dans les horizons de recouvrement les plus légers mais tombent à 30 % dans les horizons profonds. Si ces sols sont peu compacts ils sont peu poreux. Le sol 809 est exempt de sodium mais le 808 présente des teneurs, à partir de 50 cm environ dans les horizons recouverts, suffisantes pour que l'indice d'instabilité structurale dépasse 2 et atteigne 3.5 vers 100 cm.

Il faut remarquer que le site 808 présente des caractéristiques hydrodynamiques (vitesses d'infiltration et du front d'humectation) qui le rattache à la 5e catégorie mais des caractéristiques hydriques (capacité de rétention et réserve en eau utile) qui le place dans cette catégorie. Les caractéristiques hydrodynamiques du site 809 le placeraient en 3e catégorie.

En fait ces sols ne présentent pas de facteurs physiques ni hydrologiques limitants.

- vitesses d'infiltration apparente et de progression du front d'humectation bonnes.
- l'aération du profil est encore assez moyenne et malgré une perméabilité satisfaisante des risques d'asphyxie peuvent apparaître dans le site 809 où l'on remarque des taches rougeâtres.
- la réserve en eau est moyenne puisqu'elle est de 100 mm sur 1 mètre mais seulement de 20 mm environ par tranche de 50 cm en dessous.

L'effet d'un sous-solage à faible intensité et d'un labour profond sera durable car la stabilité structurale est satisfaisante.

L'irrigation par gravité est encore envisageable mais sur les sols les plus perméables il faudra peut-être lui préférer l'irrigation par aspersion.

L'engrais vert est encore une nécessité pour ces sols peu riches en matières organique, pour renforcer la stabilité structurale et augmenter le stock humique.

3 - 5 Catégorie V

superficie : ha	SONA
%	2
	2.6

Un seul type de sol représente cette catégorie :

. sol peu évolué d'apport éolien rouge (800).

Il forme un vaste ensemble dunaire très caractéristique dont seul l'extrême bord mord sur le périmètre.

Ce sol est profond et excessivement sableux ; la teneur en argile est inférieure à 2 % sur 80 cm et de 3.3 jusqu'à 70 cm environ ensuite elle retombe à moins de 1 %.

Ce sol ne présente aucune trace de sodium et possède une bonne stabilité structurale ($Is < 1$).

Les propriétés physiques et hydrologiques sont intéressantes.

La porosité totale comme pour tous les sols sahéliens est basse mais la macroporosité est élevée (27 à 30 %) sur l'ensemble du profil, assurant une bonne aération et supprimant tout risque d'engorgement et d'asphyxie.

Il faut souligner que ces sols, qui ne nécessitent pas de force de traction élevée pour être cultivés, sont cultivés traditionnellement et en priorité, par les paysans en mil, niébé et arachide.

La connaissance des propriétés hydrodynamiques et hydriques et l'observation lors des premières irrigations permettra d'ajuster les meilleures techniques culturales et d'irrigations :

- les vitesses d'infiltration apparente sont excessives. Elles atteignent 30 cm/h, toutefois après plusieurs irrigations la formation d'un glaçage devrait les rabaisser à 5/6 cm/h. (CHARREAU - NICOU 1971).
- la répartition de l'eau dans le profil est bonne et rapide sur l'ensemble du solum quelqu'en soit la profondeur.
- la capacité de rétention est faible comme les réserves en eau utile qui sont toutefois compensées par la profondeur utile :
 - . 65 mm sur 100 cm.
 - . 112 mm sur 200 cm.

Quelques points d'argile en plus améliorant sérieusement cette réserve.

- la stabilité structurale est bonne, mais après travail du sol, le manque de matière organique risque de favoriser l'érosion éolienne et hydrique.

La mise en place donc d'un système anti-érosif draconien est à prévoir (billons, buttes enherbées et éviter tout "water-ways" à partir desquels une érosion régressive peut se développer de façon incontrôlable, il faut assurer plutôt l'infiltration de l'eau).

- position topographique élevée par rapport au fleuve avec un modelé de surface parfois accentué. Ceci va entraîner des pertes de charge des motopompes et l'utilisation d'énergie de pompage plus élevée.

Ce sol réputé peu apte à la culture irriguée par beaucoup d'agronome (SOGETHA 1969) entre autre, du fait de sa pauvreté chimique et en argile et de sa faible réserve en eau utile (mesurée en laboratoire par la méthode des pF, apparaît toutefois après étude "in situ" comme l'un des plus aptes et des plus intéressants à l'irrigation et à mettre en priorité en valeur pour autant qu'il soit suffisamment proche de tout point d'eau.

Mais seules les irrigations par aspersion, par microjet ou par goutte à goutte (ces deux dernières sous basse pression) peuvent y être envisagées.

Des cultures à fort enracinement sont conseillées, mais en ajustant les doses et les fréquences il n'est pas interdit d'envisager des cultures maraîchères à faible enracinement.

Les réserves facilement utilisables de quelques cultures indiquent déjà les doses et fréquences approchées d'irrigation à prévoir et ainsi la densité du réseau d'irrigation :

+ Blé - Mais - : R.F.U. = 30 % de R.U. sur 2 mètres.

34 mm soit au maxi de consommation : 4 jours de réserve.

+ Arachide : R.F.U. = 50 % de R.U. sur 2.50 mètres.

68 mm soit au maxi de consommation : 12 jours de réserve.

+ Mil - Sorgho - Niébé - Canne à sucre : R.F.U. = 70 % de R.U. sur 3 mètres.

110 mm soit au maxi de consommation : 22 jours mais 11 j pour la canne à sucre.

En conclusion :

Il ressort des résultats que les sols des terrasses de SONA et de LOSSA, à l'exception des sols sur sables éolisés, présentent tous des caractéristiques physiques mais surtout chimiques, pour la plus part, contraignantes pour leur mise en valeur. Cette dernière risque d'être trop onéreuse pour être remboursée même sur de nombreuses années par les cultures vivrières peu rentables, surtout si elles ne produisent pas à leur optimum et si les travaux d'amélioration foncière sont à refaire à fréquence trop rapprochée.

Les sols sur recouvrement sableux et sur dunes possèdent des caractéristiques physiques facilement dominables et aucune contrainte chimique. Comme cela a été déjà démontré et proposé, dans la région de Tillabéry (VALET 1973) ce sont encore ces sols à mettre en valeur sous irrigation en priorité, en choisissant le mode d'irrigation le mieux adapté, compte tenu entre autre des contraintes topographiques.

Les sols sableux sont couramment utilisés sous irrigation, avec succès, dans le monde, entre autre aux U.S.A., en Israël et en Lybie depuis peu. Dans ce dernier pays des rendements de 35 qx/ha de blé sont obtenus à ce jour sous aspersion (Pivot-matic) sur 1 000 hectares (actuel développement 1980).

A noter que l'enfouissement des résidus de récolte non utilisés dans l'alimentation du bétail peut améliorer le bilan humique et hydrique. (PICHOT et alt. 1974).

Tous les résultats concernant les sols, propriétés chimiques, physiques et hydrologiques ont été rassemblées (Tableaux 26 et 27).

Elles ont permis de dresser la carte synthétique d'aptitude hydro-agricole des périmètres de SONA et LOSSA. (cartes 6 et 7).

Il est bien certain que malgré l'échelle à laquelle elles ont été dressées, elles n'en demeurent pas moins imprécises. Cette imprécision est étroitement dépendante de l'extrême hétérogénéité pédologique qui n'a pu être que partiellement levée même après deux prospections à grande échelle. Ces cartes rendent toutefois compte de l'importance et de la répartition des différentes aptitudes qui ont été définies.

La répartition des différents types de sol sur ces deux périmètres est la suivante :

TABLEAU 28

Catégories	Unités	SONA		LOSSA	
		ha	%	ha	%
I	Cuvettes	39.5	50.6	27.2	29.0
II	Bourrelets sablo-argileux	29.5	37.9	4.0	4.3
III	Replat sur migmatite	6.7	8.6	48.6	51.9
IV	Recouvrement sableux éolisé			12.7	13.6
V	Dunes	2.0	2.6		
Impropres	Affleurement rocheux Carrière	0	0	1.1	1.3
TOTAL		77.8	98.8	93.6	100

Cette répartition en trois groupes tient compte des aptitudes culturales dominantes et des travaux d'amélioration foncière à apporter, ainsi que des systèmes d'irrigation à adopter.

Seuls 70 ha à SONA et 90 ha à LOSSA ont été aménagés.

V - CONCLUSION

Au vue des résultats de cette étude il a été possible de dresser un bilan des deux prospections hydropédologiques réalisées sur les périmètres irrigués de LOSSA et de SONA, de synthétiser les résultats obtenus et d'en faire apparaître les insuffisances.

Les objectifs qui avaient été fixés étaient double ; d'abord de déterminer "in situ" les propriétés physiques, hydriques et hydrodynamiques des principaux types de sol des terrasses et ensuite de les replacer dans leur contexte géo-pédologique afin de mieux éclaircir les corrélations qui pouvaient apparaître entre le milieu géo-pédologique et le comportement hydrologique déterminé des sols, ce afin d'en préciser l'aptitude à l'irrigation après correction éventuelle nécessaire.

La démarche donc qui a été retenue était de conduire cette étude sur le terrain et sur les sols en place à l'aide de techniques et matériels sophistiqués et non destructives, en excluant toute artificialisation et modification aux conditions naturelles du milieu.

Les limites de ce travail sont inhérentes au choix de la méthodologie et du matériel nucléaire adopté. En procédant ainsi on s'est rendu tributaire des conditions naturelles et on a subi l'extrême hétérogénéité pédologique des terrasses. Mais la détermination des corrélations ultérieurement permet d'en gommer les trop forts écarts. La très grande simplicité du dispositif de mise en eau permet facilement sa répétition sur tous les sites. Mais le fait d'irriguer par submersion conduit à des résultats qui en dépendent entièrement. A noter aussi que la charge n'a pu toujours être maintenue constante lorsque l'approvisionnement en eau ne pouvait pas être réalisé assez vite par suite de l'éloignement du site des points d'eau.

Quant à l'utilisation des humidimètres à neutrons, si elle assure une bonne qualité des enregistrements et une bonne fiabilité et précision des mesures elle ne permet d'appréhender et suivre que des variations d'humidité ou de stock d'eau mais ne rend absolument pas compte de la circulation de l'eau dans le profil soit par ascensum soit par descendum soit latéralement.

L'abondance des résultats n'a pas été une gêne car ils ont pu être traités grâce au dépouillement automatique et à l'emploi d'un programme informatique de traitement mis au point par le C.E.A.

Il faut noter que la deuxième prospection a été conduite avec un minimum de relevés de profils d'humidité par site étudié (6/10 au lieu de 20/25). Elle a permis de vérifier qu'il y avait eu que peu de perte d'information sauf en ce qui concerne la vitesse de progression du front d'humectation insuffisamment suivie. Mais par contre un gain considérable de temps sur le terrain et une certaine économie sur le prix du dépouillement informatique étaient obtenus.

Cette étude a tout d'abord mis en relief l'influence de certains facteurs pédologiques primordiaux sur la formation du milieu physique et a expliqué non seulement la variation des sols rencontrés sur une même roche-mère mais aussi le relief.

Si les climats successifs anciens expliquent les caractères polycycliques (cuirasse, horizons rubéfiés, horizons profondément hydromorphes...) comme polygénétiques (érosion, alluvionnement, colluvionnement, recouvrement sableux) des sols des "terrasses d'érosion", le climat actuel, caractérisé par une concentration estivale des pluies, par leur faiblesse, surtout par leur répartition aléatoire dans le temps et dans l'espace rend compte du conflit pédogénèse-morphogénèse qui modèle les paysages. Ce climat renseigne aussi sur les possibilités hydrologiques de ces paysages et les espérances agronomiques dont l'accentuation de l'aridisation, depuis la sécheresse décadaire de 1968-1977, aggrave les conséquences.

Les différences essentielles de comportement hydrologique entre les sols ont été mis en relief et sont d'origines pédologiques.

C'est ainsi que la roche-mère joue un rôle déterminant, sous le climat actuel, dans le processus de pédogénèse, par sa nature minéralogique et pétrochimique. Elle conditionne la texture et le chimisme des sols.

La roche-mère est une migmatite calco-alcaline du Liptako, formation synclinale métamorphique précambienne plissée puis fracturée et soulevée par suite de mouvement épirogénique dû au contre-coup du plissement alpin, qui donne après altération des éléments psammitiques, qui libère des bases solubles, confinés dans le plasma par manque de drainage interne et qui assure la constitution d'un horizon gris-olivâtre plus ou moins argileux, continu et épais et imperméable qui influence l'infiltration et l'écoulement des pluies.

Le climat et la topographie expliquent la distribution texturale et la répartition chimique dans les paysages. La texture et le régime hydrique apparaissent topographiquement liés ; les sols prennent une couleur plus foncée des parties hautes aux parties basses avec l'accentuation de l'hydromorphie.

Texture et présence de forte teneur en sodium comme manque de matière organique et vie biologique inexistante dans ces sols expliquent leurs principales caractéristiques physiques (faible porosité totale, faible macroporosité, forte compacité et prise en masse, tendance à l'hydromorphie) et surtout leur structure. Mal structurés et assez peu stables, ces sols voient leur structure encore destabilisée par la présence du sodium qui provoque la défloculation des argiles déjà assez peu abondantes. La présence de cet élément dans l'ensemble du solum de presque tous les sols limite les possibilités d'amélioration de leur structure par le sous-solage seul et oblige d'envisager l'apport d'amendement gypseux.

Il faut souligner que l'héritage pétrochimique et minéralogique de la roche-mère s'inscrit ainsi dans le solum des sols des paysages et qu'il se manifeste par des caractères, certes, secondaires, au niveau de la famille et du faciès, bien souvent décisif en agromonie mais encore plus dans leur comportement hydrologique pour en tenir compte dans l'aménagement des terrasses.

C'est ainsi que les conditions texturales et chimiques déterminantes sur l'agrégation des sols, vont influencer le comportement hydrologique des paysages des terrasses en intervenant à la fois sur l'infiltration, la transmissivité et la cessibilité de l'eau.

Elles régissent toute l'économie de l'eau des profils.

Leur comportement hydrologique dépend ainsi étroitement des conditions géo-pédologiques.

+ L'infiltration et l'avancement du front d'humectation dans le profil sont :

- . ralentis et ne dépassent pas respectivement 1 cm/h et 5 cm/h, quand :
 - la teneur en argile atteint 18 %
 - la teneur en sodium échangeable est de 4 m.équ/100 g
 - la densité apparente atteint 1.70 et même 1.80 mais dans ce cas pour des teneurs en argile inférieures à 10/15 %.
 - l'indice d'instabilité structurale (Is) dépasse 3/4.
- . quasiment nuls et l'horizon est imperméable quand :
 - la teneur en argile atteint 30/40 %
 - la teneur en sodium échangeable est supérieure à 5 m.équ/100 g
 - la densité apparente atteint et dépasse 1.80 pour des teneurs en argile supérieures à 15 %
 - l'indice d'instabilité structurale Is atteint 7.

+ La réserve en eau utile :

- . croît avec la teneur en argile et passe par un maximum avant de diminuer. Ce maximum correspond à 38 % et 40 % d'argile pour des densités supérieures ou inférieures à 1.70.
- . diminue, pour différentes classes texturales avec la teneur en sodium échangeable et l'augmentation de l'instabilité structurale.

Un sous-solage aura donc un double effet, en permettant :

- . d'utiliser des sols à des teneurs en argile plus élevées ;
- . d'accroître la réserve utile en eau par abaissement de la densité apparente (de 4 à 6 points/10 cm).

Ces résultats ont une portée certaine puisque les sols des terrasses ont pu être classés en cinq catégories, selon leur comportement hydrologique spécifique. Pour leur mise en valeur ils ont en plus été concentrés en trois groupes qui nécessitent des améliorations spécifiques, des traitements particuliers et des systèmes d'irrigation adaptés pour venir à bout de leur contraintes ou pour moins les subir.

- groupe des sols lourds, imperméables et salés de la catégorie I qui conviennent à la riziculture en semi-submersion.
- groupe des sols à texture mieux équilibrée, compacts, faiblement à moyennement perméables partiellement salés ou non des catégories II et III qui nécessitent des améliorations foncières efficaces tel que sous-solage, billonnage, drainage et l'irrigation par gravité ou par aspersion.
- groupe des sols sableux poreux, peu compacts, très perméables, à réserve utile en eau moyenne à faible, accidentellement salés en profondeur des catégories IV et V qui nécessitent selon leur pente la mise en place de systèmes anti-érosifs draconiens et une irrigation par aspersion ou, par microjet ou par goutte à goutte.

Ainsi pour chaque groupe la connaissance des modalités nécessaires à leur mise en valeur permet de l'évaluer en terme de coût.

Le groupe des sols sableux des catégories IV et V apparaît posséder les propriétés physiques et hydrologiques les moins contraignantes pour en recommander la mise en valeur en priorité.

Il n'est pas inutile d'attirer l'attention sur le fait que l'irrigation des sols des terrasses, dont la texture, sous la pluvio-métrie actuelle, maintient la perméabilité à des niveaux qui limitent et fixent la pédogénèse, va entraîner une nouvelle évolution pédogénétique qu'il serait nécessaire de caractériser et d'en suivre les effets physico-chimiques et les conséquences agronomiques.

Le déséquilibre édaphique de cette zone sahélienne qu'accentue encore la dernière sécheresse, la culture itinérante, la mise en valeur agricole plus ou moins continue par suite de la poussée démographique, qui en réduit les jachères et leur durée, et une régénération naturelle insuffisante, oblige à une utilisation moderne, rationnelle et conservatrice ou amélioratrice des terroirs. La mise en place d'aménagements hydro-agricoles dans lesquels les conditions artificielles créées peuvent pallier à ces conditions négatives, devient une nécessité pour assurer une production alimentaire accrue et constante.

Il faut signaler de plus que l'utilisation de cette méthode d'étude "in situ" des caractéristiques physiques, hydriques et hydrodynamiques des sols des terrasses s'est avérée particulièrement intéressant et fiable pour que soit envisagé dorénavant un travail en équipe qui réunirait géologue, pédologue, hydropédologue auxquels l'appui de phytosociologue et d'écologiste ne serait pas superflu.

DIAGRAMMES GRANULOMÉTRIQUES

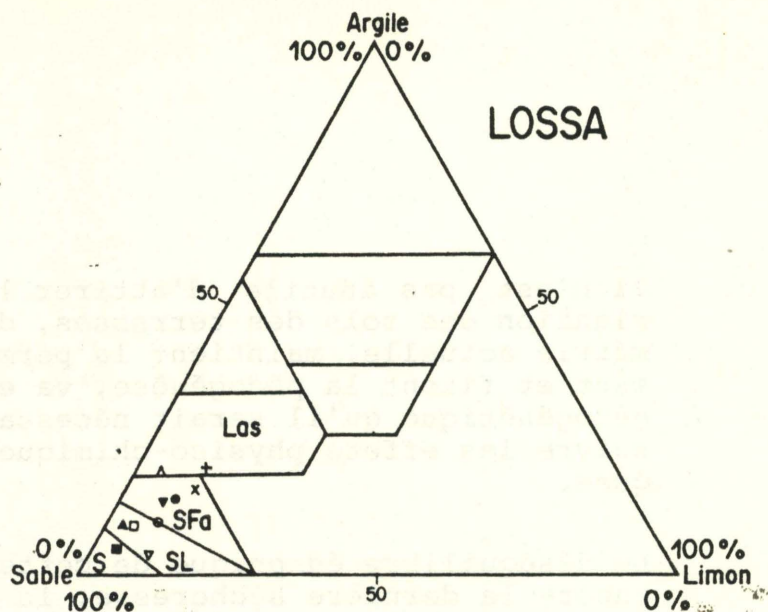
- 805 ■ 0 - 50cm
□ 50-200cm

- 806 ● 0 - 80cm
○ 80-200cm

- 807 + 0 - 90cm
x 90-200cm

- 808 ▲ 0 - 70cm
△ 70-200cm

- 809 ▼ 0 - 70cm
▽ 70-200cm



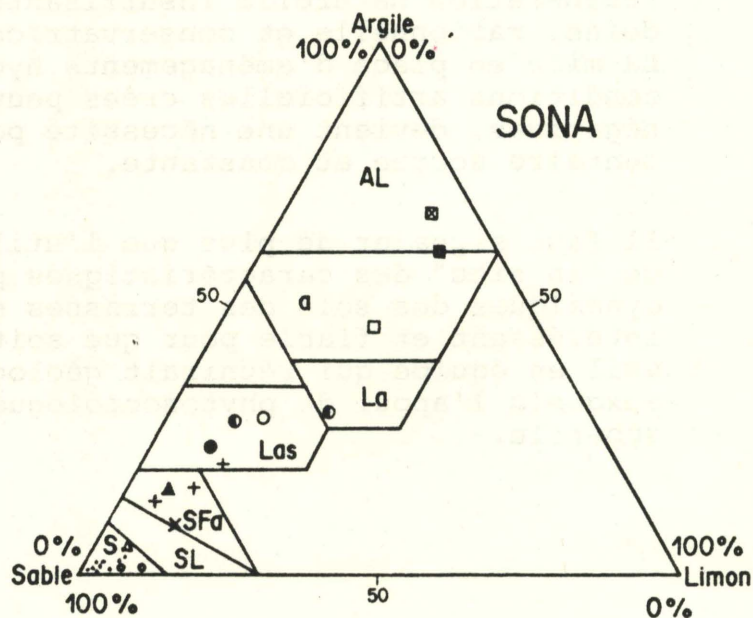
- 800 ∴ 0 - 200cm

- 801 ● 0 - 70cm
○ 70-110cm
◐ 110-200cm

- 802 + 0 - 80cm
x 80-100cm
○ 100-200cm

- 803 □ 0 - 40cm
■ 40-100cm
▣ 100-200cm

- 804 ▲ 0 - 120cm
△ 120-180cm



- 810 + 0 - 40cm
x 40-80cm

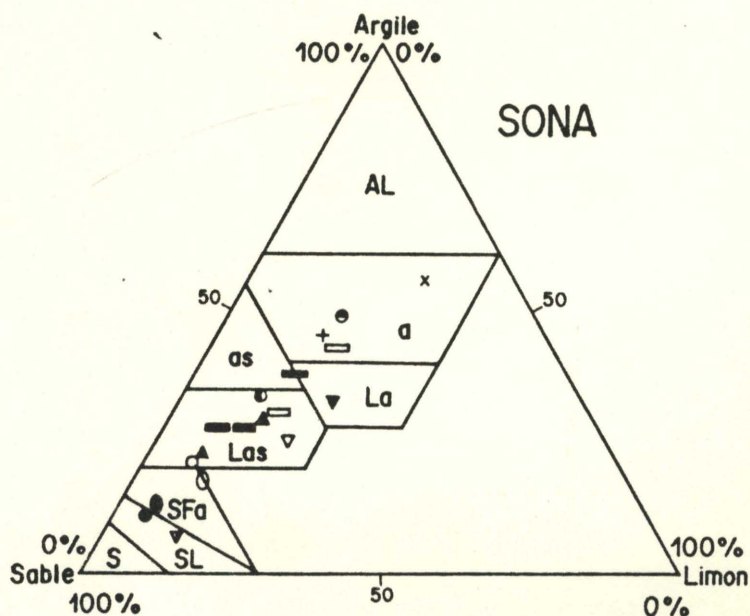
- 811 ▼ 0 - 60cm
▽ 60-80cm
▽ 80-120cm

- 812 ● 0 - 60cm
813 ○ 60-100cm
814 ○ 60-100cm

- 815 ● 0 - 40cm
○ 40-60cm
◐ 60-80cm
◑ 80-160cm

- 816 ▲ 0 - 20cm
△ 20-60cm

- 817 ■ 0 - 40cm
818 ▣ 40-120cm
819 ▣ 40-120cm



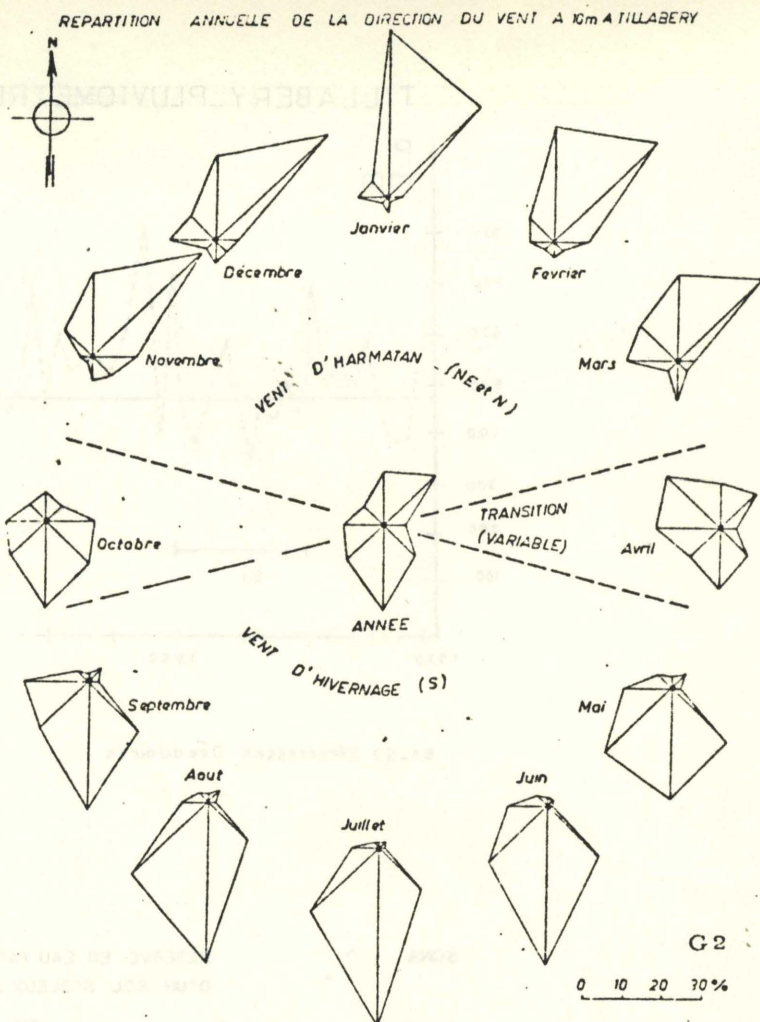
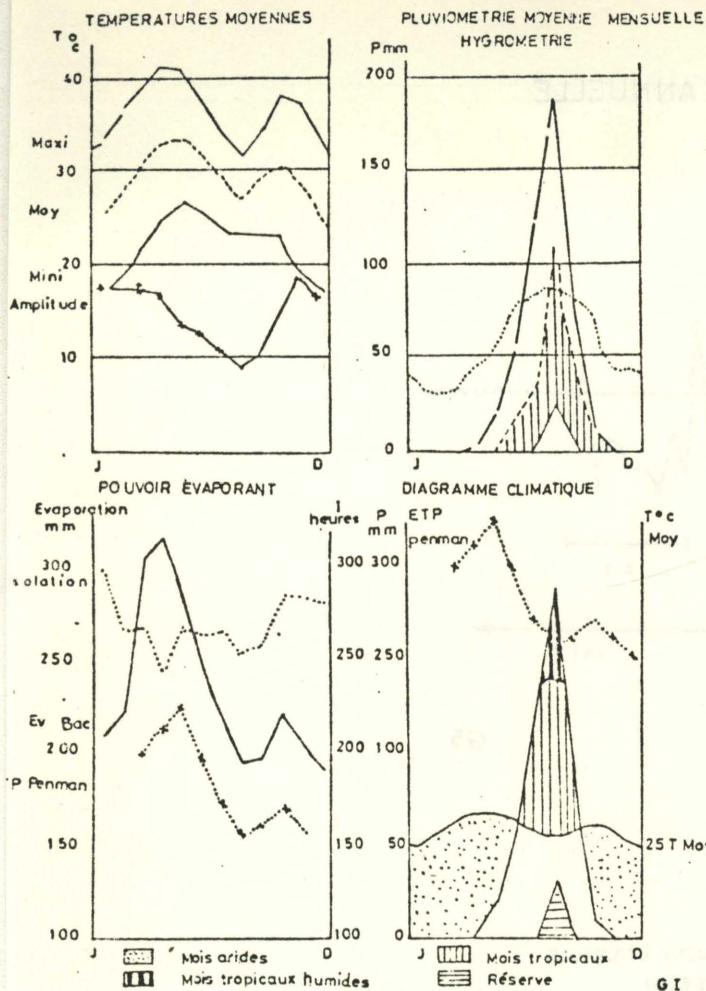
AL = Argile lourde

a = Argile

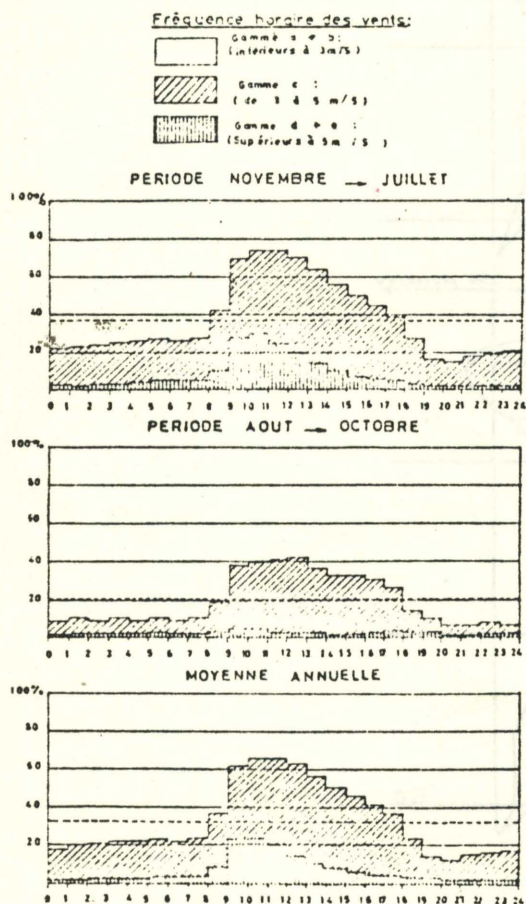
S = Sable

L = Limons

SFa = Sable faiblement argileux

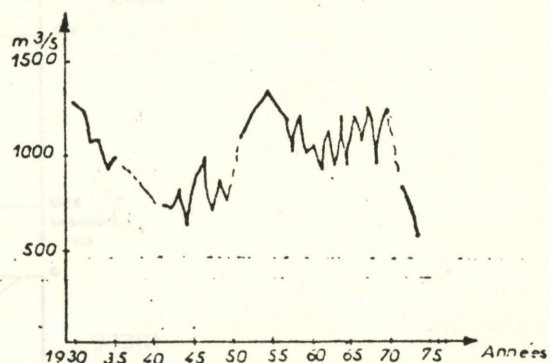


DISTRIBUTION HORAIRE EN GAMME DE LA VITESSE DU VENT A 10 MÈTRES (Moyennes inter-annuelles: 5 années)

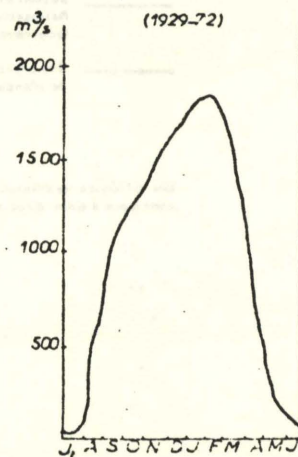


G 3

LE NIGER
DEBITS MOYENS ANNUELS A NIAMEY

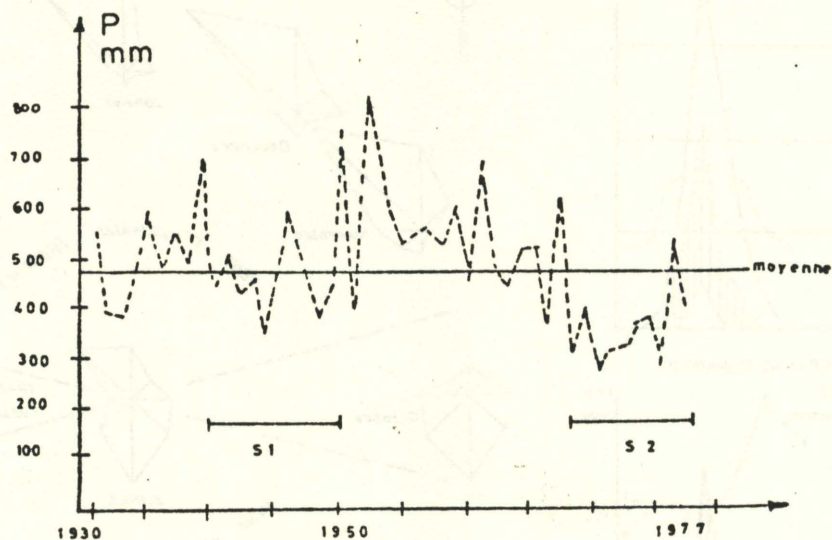


DEBITS MOYENS MENSUELS A NIAMEY



G 4

TILLABERY_PLUVIOMETRIE_ANNUELLE

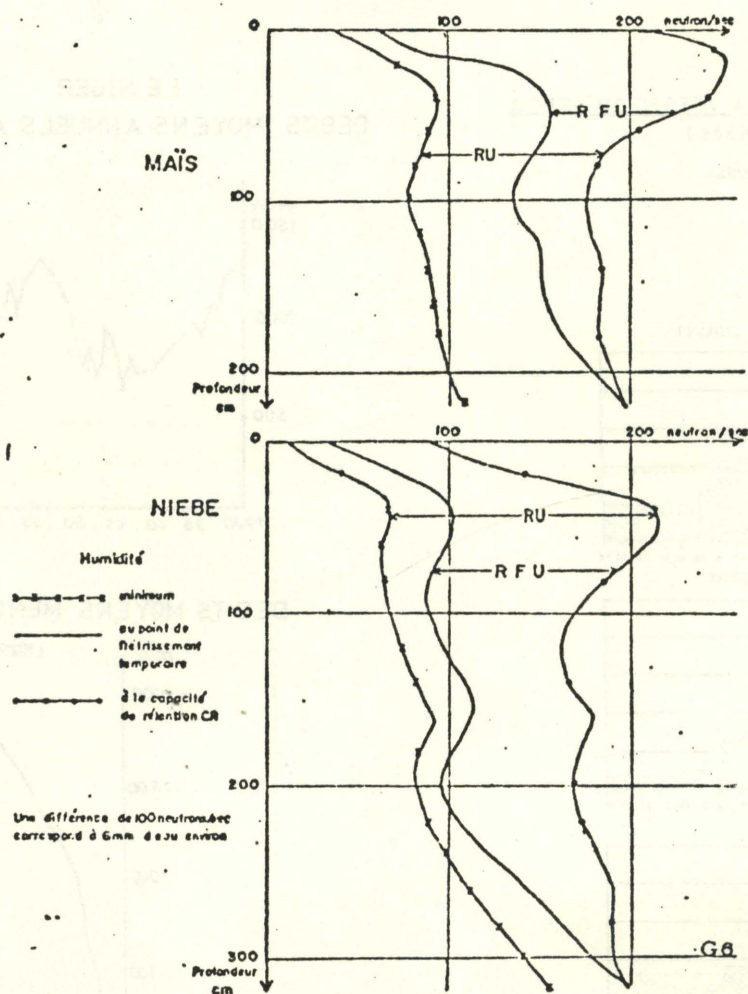


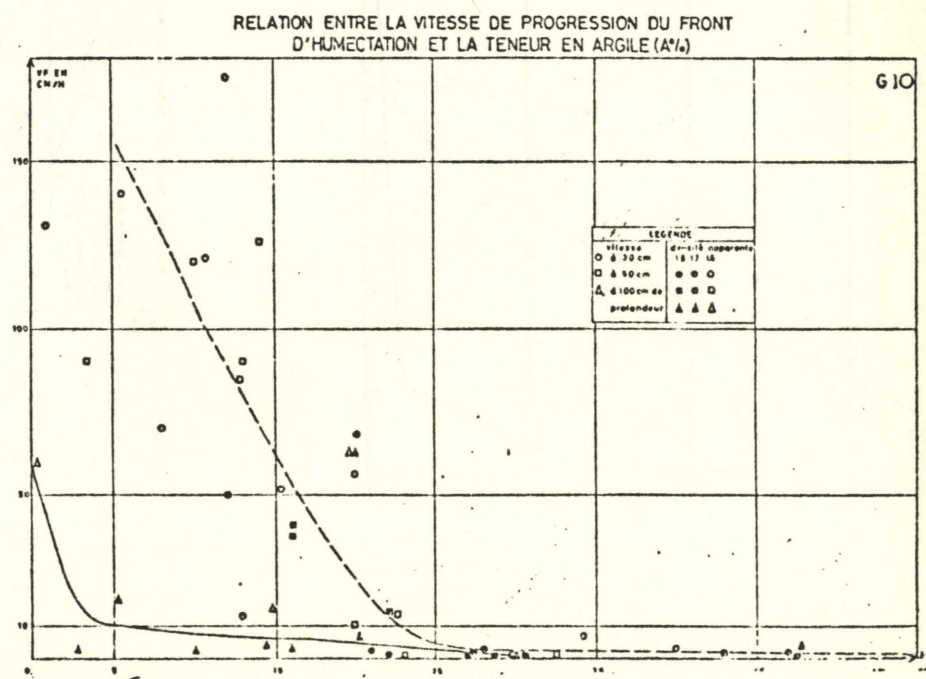
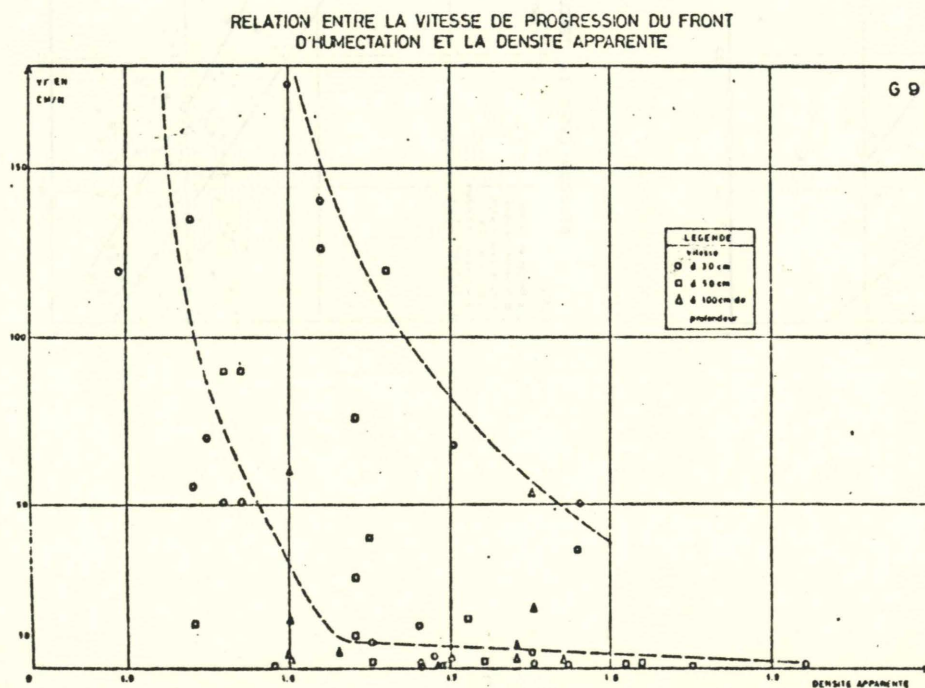
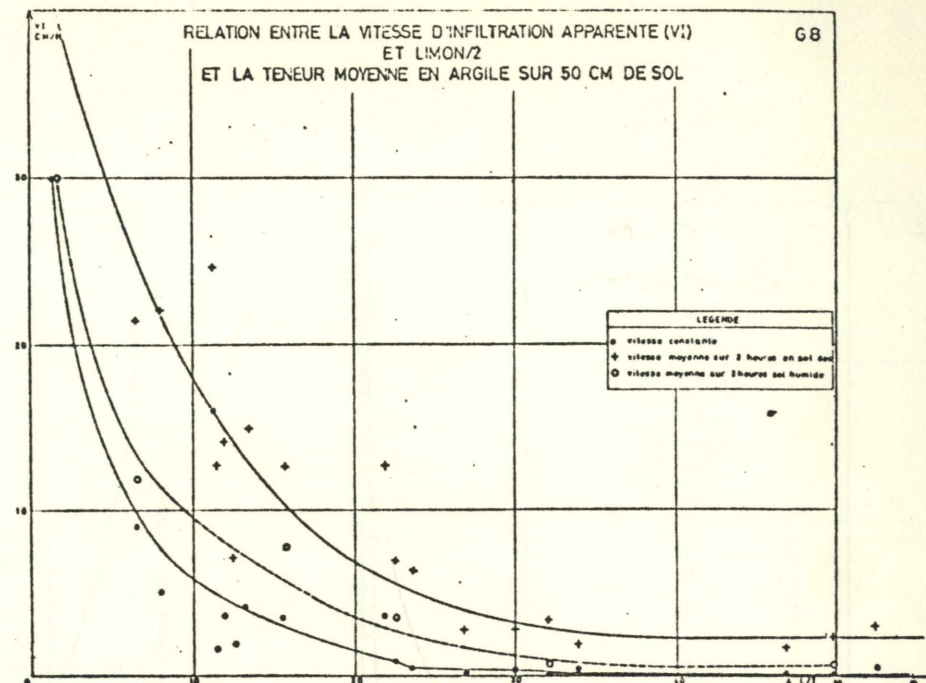
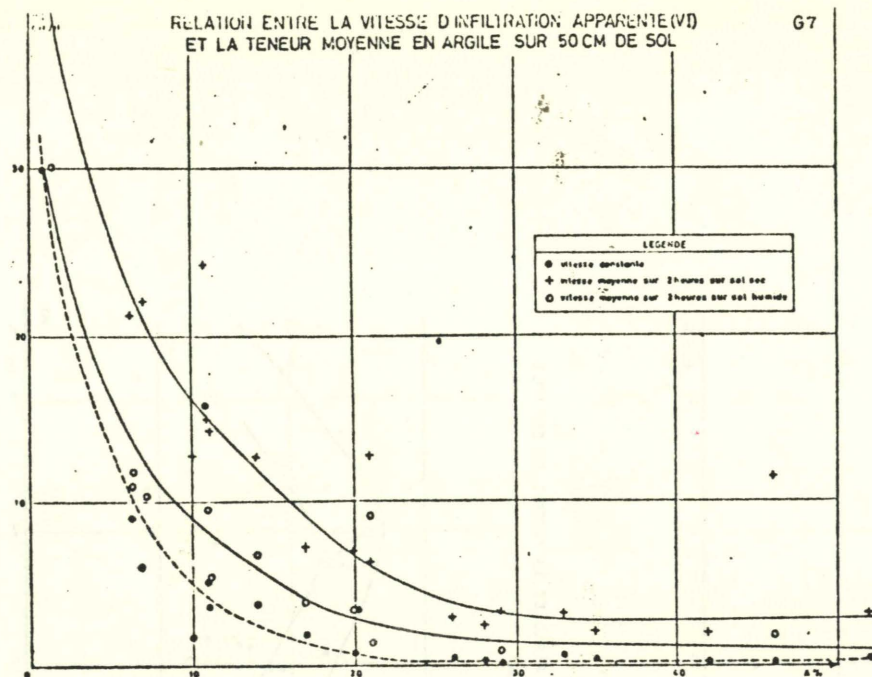
S1-S2 Sécheresses Décadaires

G5

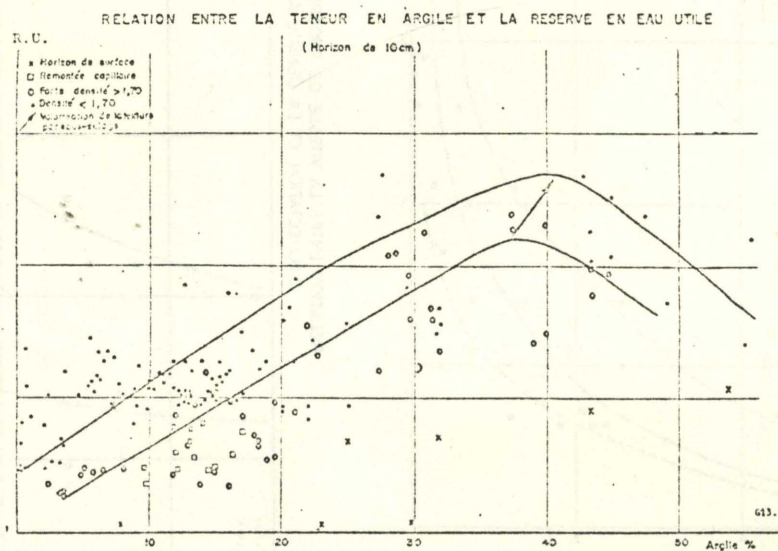
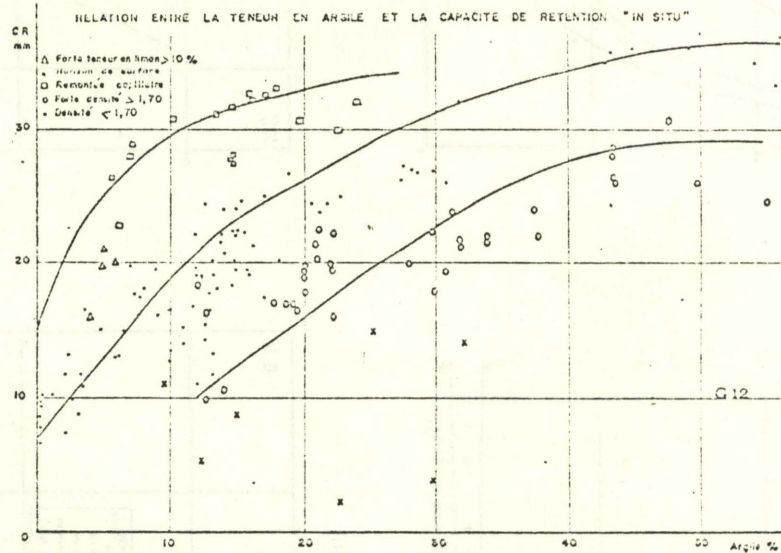
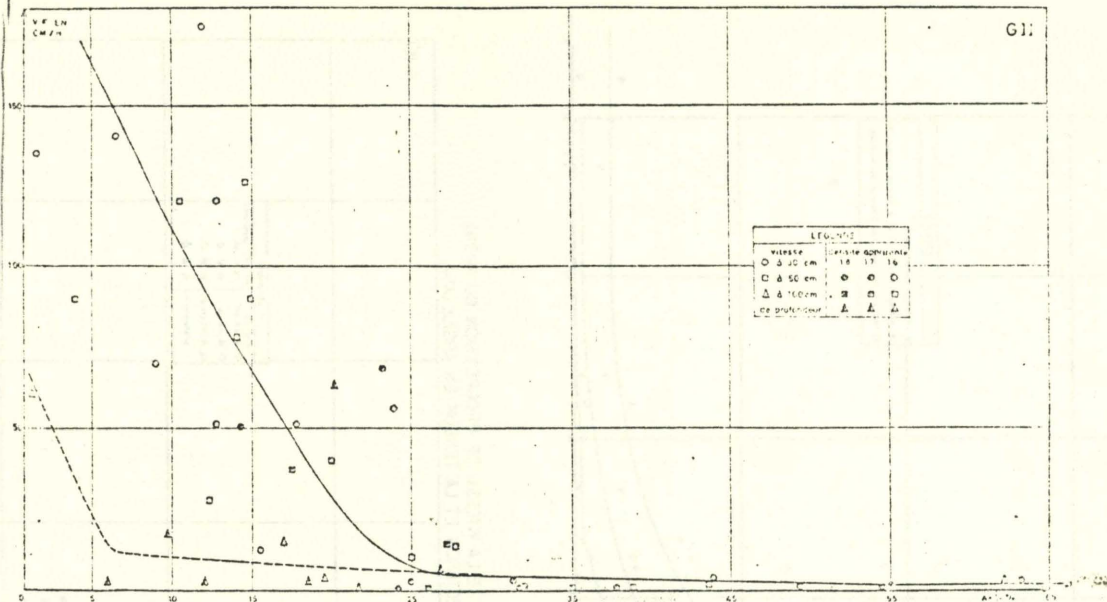
SONA

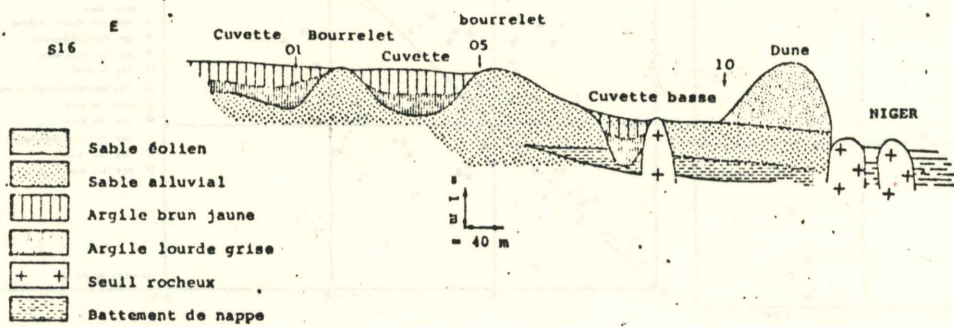
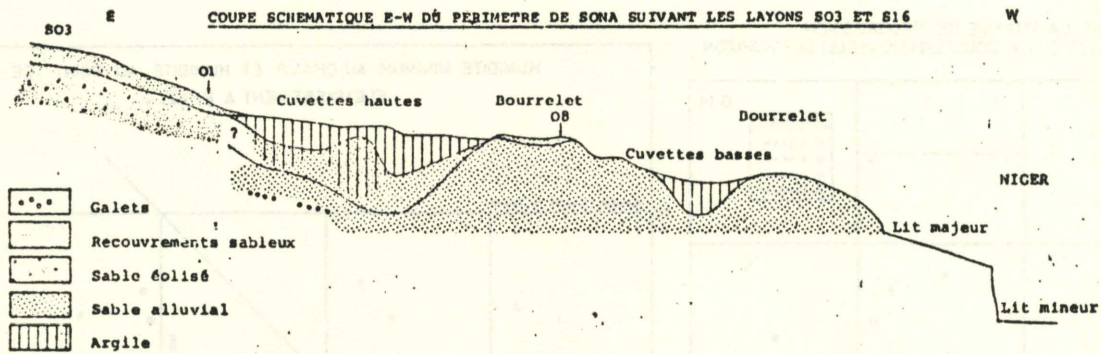
RESERVE EN EAU FACILEMENT UTILISABLE
D'UN SOL SABLEUX (SITE 800)





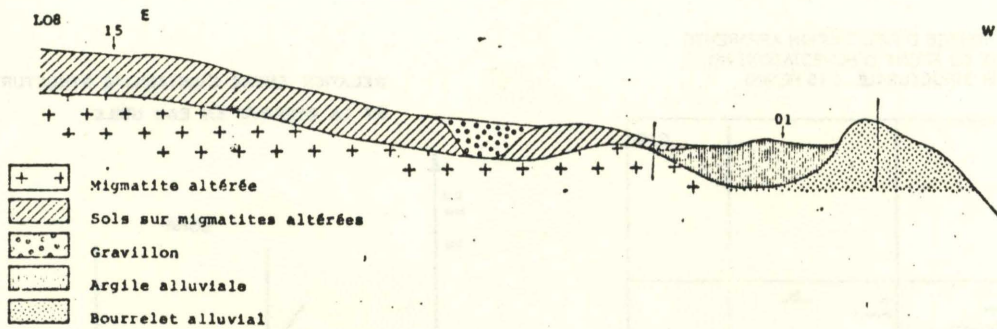
RELATION ENTRE LA VITESSE DE PROGRESSION DU FRONT
D'HUMECTATION (VF) ET LA TENEUR EN ARGILE • LIMONS/2



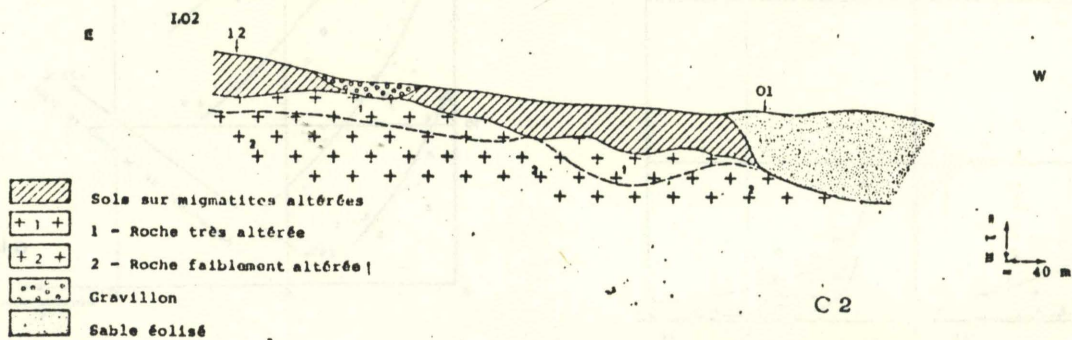


C. FEAU

C 1



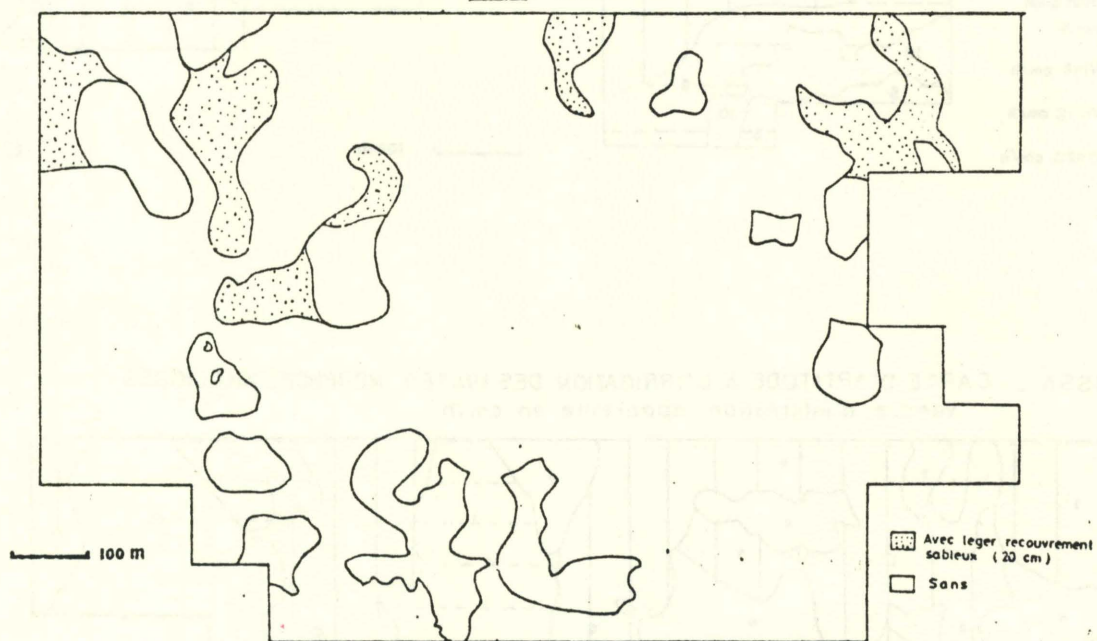
COUPE SCHEMATIQUE E-W DU PERIMETRE DE LOSSA SUIVANT LES LAYONS LO1 ET LO2



C 2

LOSSA-SITUATION DES SOLS ALLUVIAUX LOURDS ET SODIQUES
(EISMA - C. 1979)

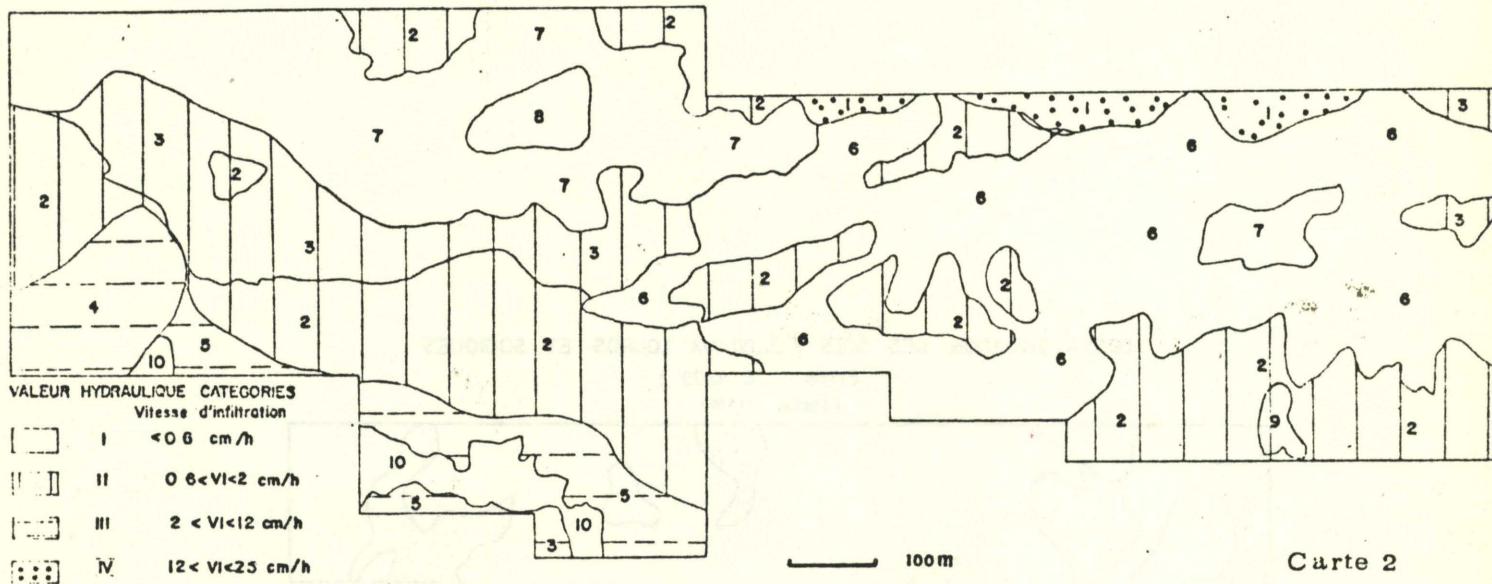
Echelle: 1/5 000



Carte 1

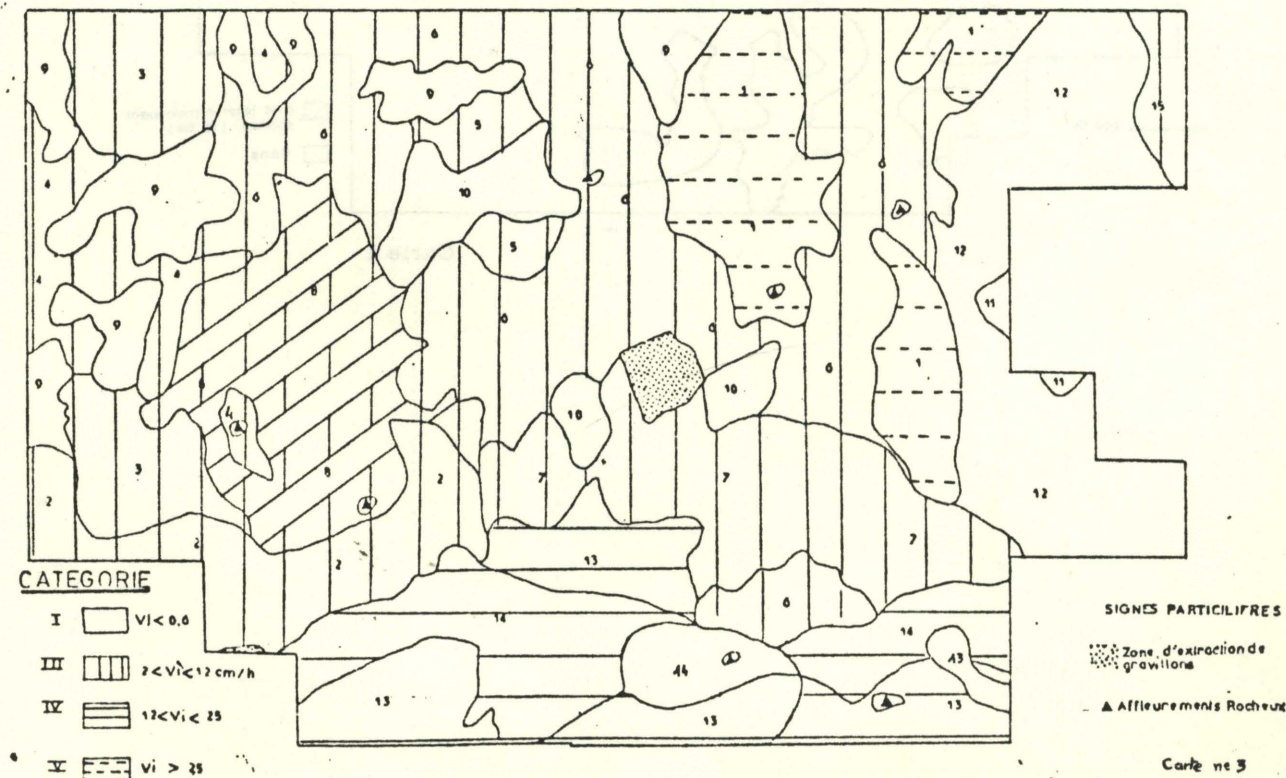
SONA

CARTE D'APTITUDE A L'IRRIGATION DES UNITES MORPHO-PEDOLOGIQUES Vitesse d'infiltration apparante en cm/h



Carte 2

LOSSA - CARTE D'APTITUDE A L'IRRIGATION DES UNITES MORPHOPEDOLOGIQUES Vitesse d'infiltration apparante en cm/h

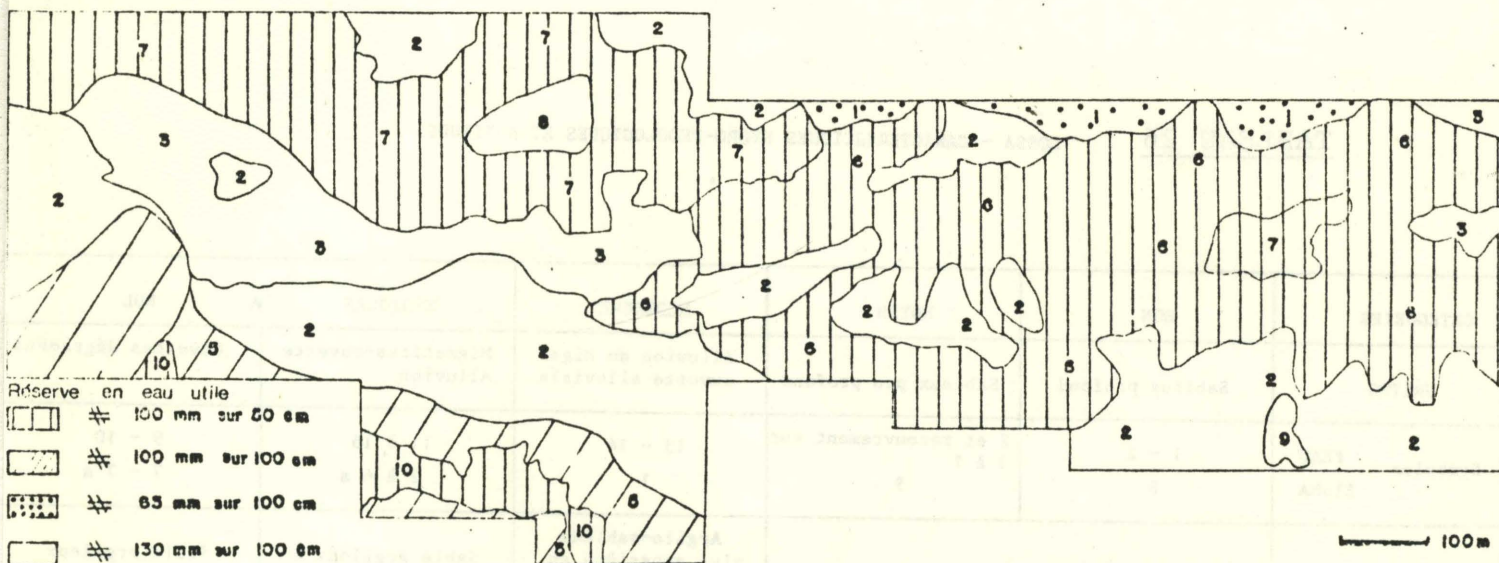


Carte ne 3

CARTE D'APTITUDE A L'IRRIGATION DES UNITES MORPHO-PEDOLOGIQUES

Reserve en eau utile

SONA



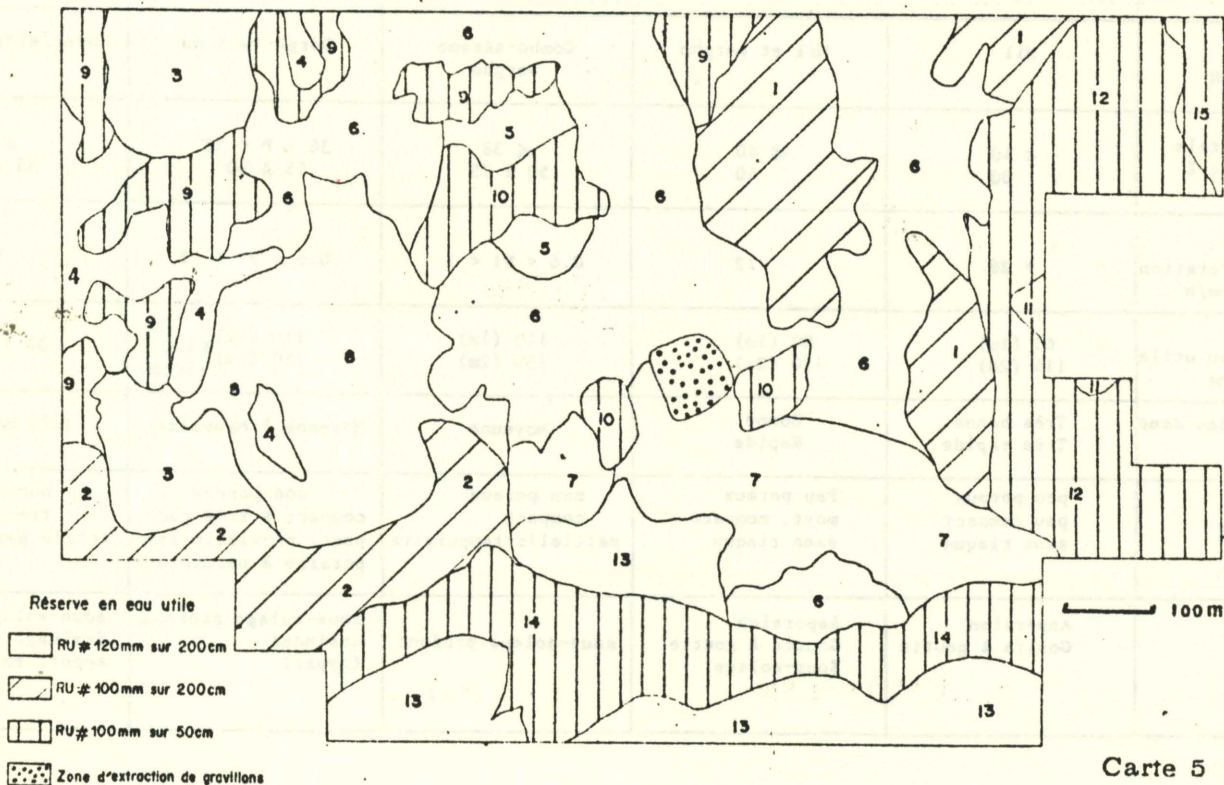
Carte 4

LOSSA

CARTE D'APTITUDE A L'IRRIGATION

DES UNITES MORPHOPEDOLOGIQUES

Reserve en eau utile

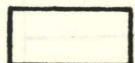
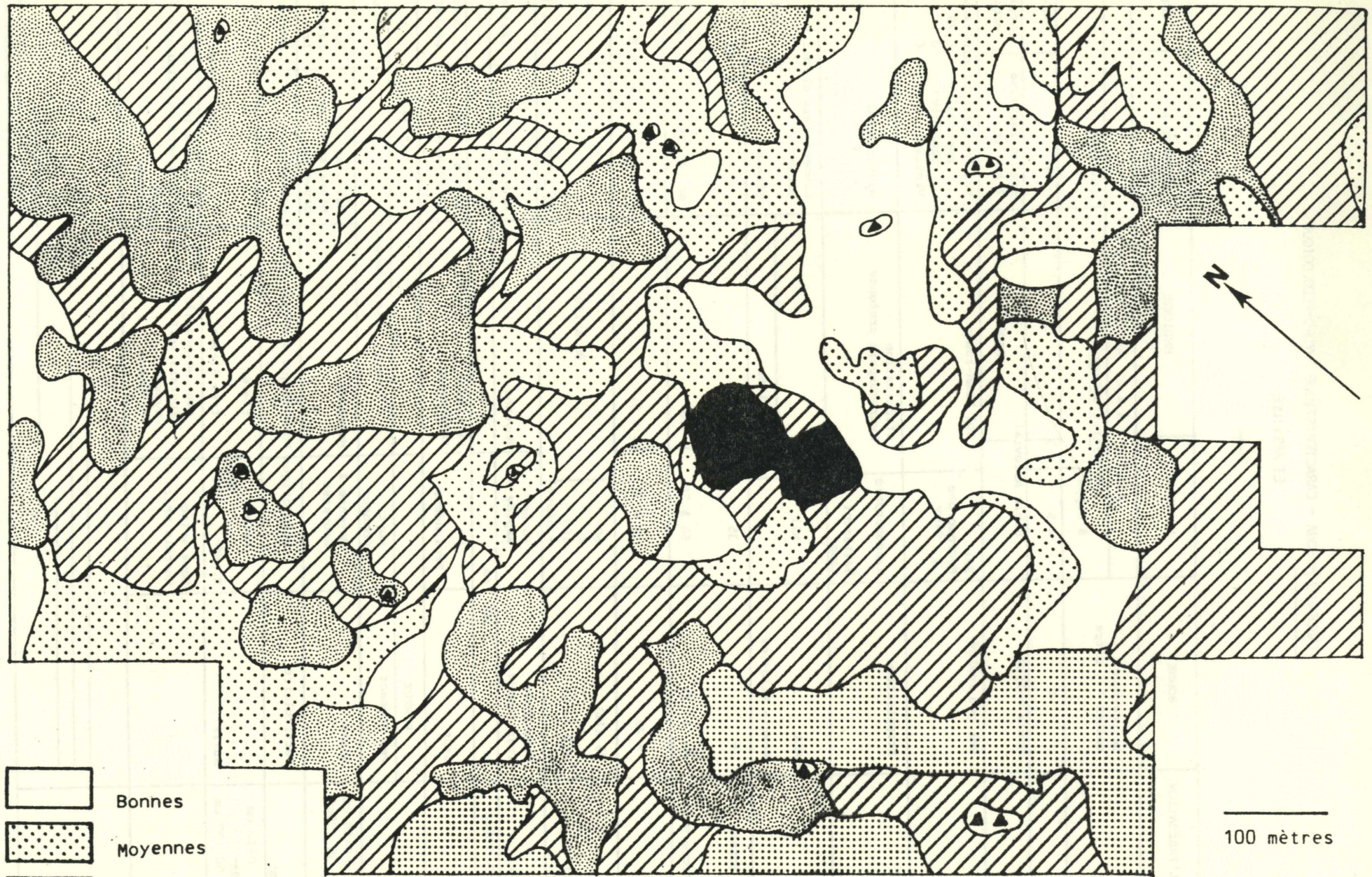


Carte 5

TABLEAU 26 : LOSSA - CARACTERISTIQUES HYDRO-PEDOLOGIQUES ET APTITUDE

CATEGORIES	BON	MOYEN	MEDIOCRE	MEDIOCRE	NUL
UNITES	Sableux profond	Sableux peu profond	Alluvion du Niger cuvette alluviale	Migmatites-cuvette Alluvion	Cuvettes dégradées
Symboles	FEAU EISMA	2 et recouvrement sur 3 à 7	13 - 14 1	11 à 15 2 à 6 a	9 - 10 7 - 7 a
MATERIAU	Sable éolisé		Argilo-sableux plus grossière en profondeur	Sable argileux à argilo-sableux	Sable argileux graviers
TYPOLOGIE	Sol peu évolué d'apport éolien		Sol brun (calciqne)	Sol brun à pseudogley	Sol brun hydromorphe
ALCALIS	NON SODIQUE		Faiblement sodique	Très sodique à faible profondeur Dès la surface	
PEDOGENESE	STEPPISATION			Steppisation et hydromorphie superficielle	
VEGETATION	Mil	Mil et sorgho	Combo-sésame Sorgho	Sorgho-sol nu	Shoenfeldia gracilis
POROSITE Totale Micro/totale %	< 40 30	< 40 40	< 38 50 à 75	36 < P < 38 55 à 90	< 36 85 à 95
Vitesse infiltration cm/h	> 26	12	0.6 < V _I < 3	0.6 < V _I < 12	< 0.6
Réserve en eau utile mm	65 (1m) 115 (2m)	80 (1m) 120 (2m)	110 (1m) 150 (2m)	110 (1m) à 100 150 (2m) (50cm)	100 (50 cm)
Répartition eau dans profil	Très bonne Très rapide	Bonne Rapide	Moyenne	Moyenne à Mauvaise	Très mauvaise
ASPHYXIE	peu poreux peu compact sans risque	Peu poreux moyt. compact sans risque	non poreux compact partielle-temporaire	non poreux compact à très com- pact, partielle-tem- poraie à permanente	non poreux très compact totale permanente
	Aspersion Goutte à goutte	Aspersion Goutte à goutte Sous-solage	sous-solage profond	sous-solage profond drainage (gypse)	sous-solage profond drainage apport massif de gyps

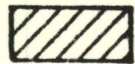
LOSSA - APTITUDES HYDRO-AGRICOLLES



Bonnes



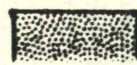
Moyennes



Moyennes à médiocres



Médiocres



Nulles



Pointements rocheux

100 mètres

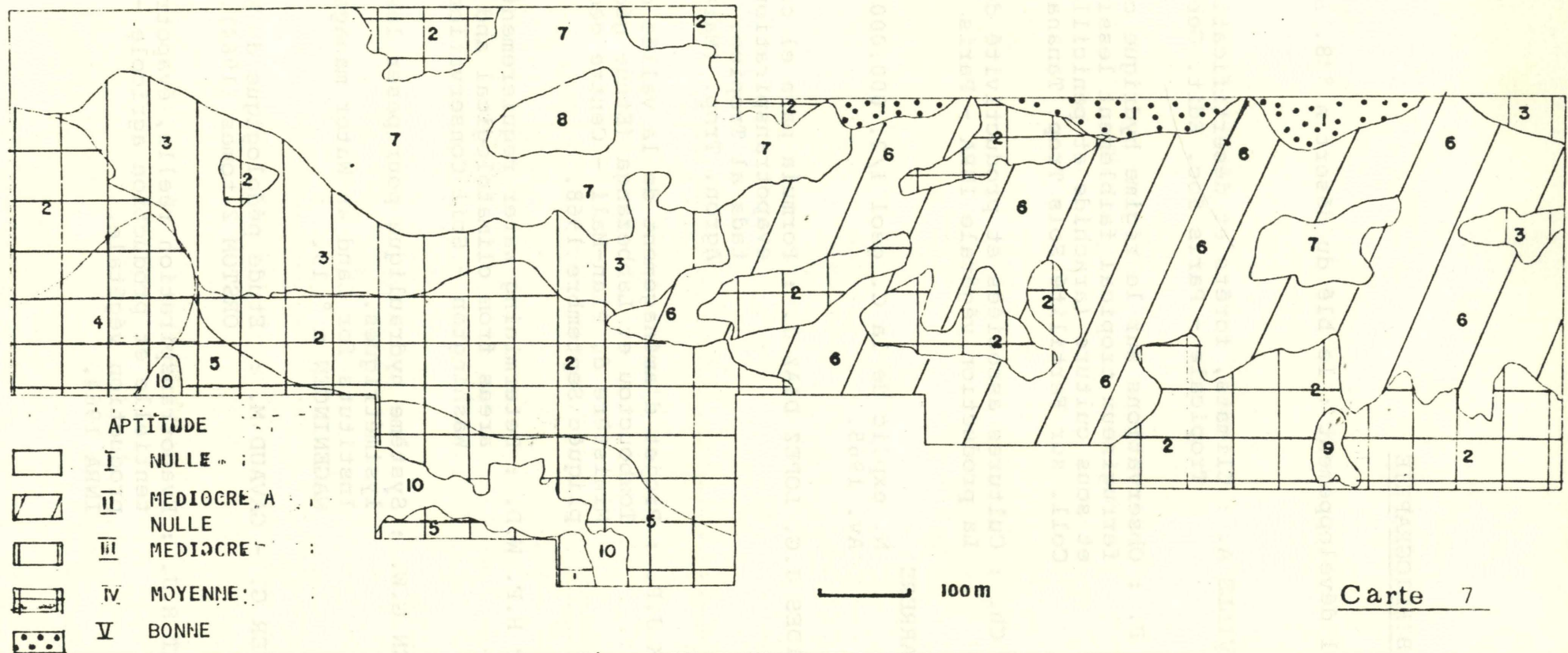
CARTE 6

**TABLEAU 27- SONA - CARACTERISTIQUE HYDRO-PEDOLOGIQUE
ET APTITUDE**

APTITUDE A L'IRRIGATION	BONNE	MOYENNE	MEDIOCRE	MEDIOCRE A NULLE	NULLE
UNITES	Recouvrement Eolien > 1 mètre	Terrasse Alluviale			
		Bourrelet sableux à nappe		Cuvettes	
SYMBOLES (1)	1	4-5	2 3	6	7-8-9-10
MATERIAU	Sable éolisé	Sable Alluvial Argileux		Argile Sableuse à argile	Argile à argile lourde
TYPOLOGIE	Sol peu évolué	Sol Hydromorphe à gley	Sol brun-rouge	Sol hydromorphe minéraux : pseudogley : 6,79 6-7-9 amphygley : 10 Vertisol : 8	
PEDOGENESE	Steppisation	Hydromorphie Battement de nappe	steppisation Hydromorphie profonde	Hydromorphie	
VEGETATION	Mil	Mil		Schoenfoldia gracilis Sorgho	Sol nu
	Acacia Nilotica		Balanites	Sésame	
Totale	38	35	30 à 29	32 à 30	
POROSITE % micro/Maxi	30 à 35	50 à 70	70	60 à 75	80 à 95
VITESSE INFILTRATION APP. cm/h	> 20	12 à 3	3 à 0,6	< 0,6	
RESERVE EAU UTILE (mm)	65 (1m) 120 (2 m)	60 à 150 + nappe	80 à 130	80 à 100	80 à 140
REPARTITION DANS LE PROFIL	Très bonne Très rapide	Bonne Rapide	Moyenne	Mauvaise	Très mauvaise
PROFONDEUR HUMECTABLE	200 cm		80 cm	60 à 90 cm	20 à 50 cm
TENDANCE A L'ASPHYXIE	Sans	en Profondeur	Partielle temporaire	totale temporaire	totale permanente
COMPACITE	POREUX		PEU POREUX		
	Peu Compact	Moyt. Compact	Compact à très compact		très compact
STABILITE STRUCTURALE	-0-50 cm 50-100cm	Bonne	Moyenne à mauvaise	Mauvaise Mauvaise à très mauvaise	Mauvaise à très mauvaise très mauvaise
STRUCTURE (20 - 50/80 cm)	Particulaire	Polyédrique	Polyédrique à prismatique	Prismatique	Massive
ALCALINISATION	0-50 cm 50-100 cm	Nulle	Faible Elevée Faible	Elevée Très élevée	Très élevée
AMELIORATION		Sous solage Engrais vert	sous solage (1x1) Engrais vert Gypse Drainage	sous-solage (0,5 x 0,5 cm) engrais vert et chimiques acidifiants gypse drainage	
CULTURE					
CANNE A SUCRE					
COTON					
AGRUMES					
SORGHO					
RIZ					

CARTE D'APTITUDE A L'IRRIGATION DES UNITES MORPHO-PEDOLOGIQUES

SONA



VI - BIBLIOGRAPHIE

Actuel développement : le blé du désert n °38. Sept-Oct. 1980.

AUBREVILLE A. : Climats, forêts et désertification de l'Afrique
Tropicale - Paris Soc. Edit. Geog. 1949.

AUDRY P. : Observations sur le régime hydrique comparé d'un sol
ferrugineux tropical faiblement lessivé sous savane
et sous culture (arachide et penicillaire).
Coll. sur Fertilité Sols Trop. Tananarive 1967.

BALDY Ch. : Cultures associées et productivité de l'eau.
La production végétale INRA - Paris 1963.

(2) BARRERE

N. explic de la C. geol 1/2. 000.000 de A occid
Av. 1965.

BENAVIDES J.G. LOPEZ DIAZ J. : Formula para el calculo de la
evapotranspiration potential adapta-
da al Tropico.
Agron. Trop. (Maracay) 1970.

BLANCK J.P. : Projet d'aménagement de la vallée du Niger entre
Tombouctou et Labbezanga (Etude géomorphologique).
Ministère du Plan-Mali - Centre géographique ap-
pliquée Septembre 1968.

BLANEY H.F. W.D. : Determining water requierements in irrigated
areas from climatological and irrigation date.
Washington - Soil Conservation Service 1950.

BLOEMEN G.W. : Système hydraulique pour peser les grandes cases
lysimétriques.
Instituts for Land an Water management Research
WAGENINGEN n ° 19.

BOCQUIER G. - GAVAUD M. : Etude pédologique du Niger Oriental -
ORSTOM 2 tomes (1964).

BOUCHET R.J. : Evapotranspiration réelle, évapotranspiration po-
tentielle et production agricole - in l'eau et la
production végétale.
INRA 1964.

BOULET R. : Toposéquence de sols tropicaux en Haute-Volta.
Equilibre dynamiques et bio-climats.
Université L. Pasteur - Strasbourg 1974.

BRYSSINE G. : Contribution à l'étude des propriétés physiques
des sols.

V - Note sur l'appréciation de la porosité du sol
et en particulier celle des fentes.

VI - Note sur la compacité.

Travaux de Sect. de Pédol. SC. Nat et Phys Maroc
Tomes 13 - 14 - 1958 - 59.

BRGM : Implantation de cultures irriguées en régime sahélien à
Lossa (Niger).
Séminaire International d'expert consacré à la politique
de l'Eau pour l'Agriculture et l'Elevage en zones arides
et semi-arides.
Niamey - Niger 12-17 Février 1979.
CIEH - CEFIGRE.

BÜDEL J. : Bericht Über Klima - morphologische und.
Eiszert - Forschungen in Niederafrika.
Erdkunde. Dtsch. t6 n ° 2-3 - 1952.

Bulletin Tech. G.R. : Application de la formule de TURC à la déter-
mination des besoins en eau d'irrigation.
n ° 55 (2) 1961.

CHAROY J. : Exploitation des mesures neutroniques effectuées pour
l'étude des relations "in situ", eau-sol-plante.
Mimeo IRAT.

CHAROY J. : Les cultures irriguées au Niger. Résultats de sept
années de mesures et d'expérimentations (1963-1970)
à la station expérimentale (SEHA) de TARNA dans le
Goulbi de MARADI.
Agronomie Trop. Vol XXVI, n ° 9 Sept. 1971.

CHAROY J. - FOREST F. - LEGOUPIL J.C. - BASSEREAU D. :
- besoin en eau de la canne à sucre.
Mimeo IRAT Juillet 1978.
Evaluation fréquentielle des besoins d'irrigation
pour l'optimisation d'un projet d'aménagement hydro-
agricole (SONA) mimeo INRAN - IRAT Août 1978.

CHAROY - FOREST - LEGOUPIL : Evaporation - Besoins en eau des cultures - Relation eau-sol-plante - Estimation fréquentielle des conditions d'alimentation hydrique en culture pluviale et irriguée - Bilan hydrique.
IRAT Avril 1978.

CHARREAU : Influence des techniques culturales sur le développement du ruissellement et de l'érosion en Casamance.
Agro Trop n ° XXIV - 9 - 1969.

CHARREAU : Dynamique de l'eau dans deux sols du Sénégal.
Agro Trop 1960.

CHARREAU C. - NICOU R. : Amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo argileux de la zone tropicale sèche Ouest-Africaines et ses incidences agronomiques.
Agro Trop 1971.

CHARREAU C. - SEGUY C. : Mesure de l'érosion et du ruissellement à SEFA en 1968 Agro Trop Vol XXIV n ° 11
Nov. 1969.

CHRISTIANSEN J. E. : Estimating pan evaporation and evapotranspiration from climatic data.
ASCE Irrigation and drainage.
Nov. 1966.
iv. Symp. ou méthode for estimating évapotranspiration.

CIEH : Influence d'un plan d'eau de vaste superficie sur le climat d'une région semi-aride.
n ° 10 - Août 1972.

CIEH : L'utilisation des ressources en eau et des terres des régions de savane.
Volume 1 - CIEH - USAID et TAMS.

CILSS : Réunion sur la sécheresse - Niamey 25 Févr. 1974.
BOUDET - GILET.

COCHEME J. - FRANQUIN P. : Une étude d'agroclimatologie de l'Afrique sèche au Sud du Sahara en Afrique Occidentale.
Projet conjoint d'Agroclimatologie
FAO/UNESCO/OMM-FAO. Rome 1967.

- COMBEAU A. : Observation sur certains facteurs de la rétention d'eau par le sol pour diverses valeurs remarquables du pF.
(Application à quelques types de sols tropicaux).
- COUCHAT Ph. : Les techniques nucléaires appliquées au cycle de l'eau en Agronomie. Bilan et perspective.
CEA 1972.
- CTFT : Défense et restauration des sols - Résultats des essais effectués à la station de "l'aviation" (N'DOUNGA) de 1972 à 74.
Mimeo CTFT Janv. 1975.
- DAGG M. : Factors effecting the use evaporation pan data in east Africa. EAAFRO Nairobi Kenya - 25 fév. 1969.
- DAGG M. - BLACKIE J.R. : Estimates of evaporation in East Africa in relation to Climatological classification.
- DANCETTE C. : L'évapotranspiration et l'évolution des profils hydriques par rapport aux principales caractéristiques hydriques d'un sol.
Exposé à la chaire de Pédologie et de Science du Sol ENSA - Montpellier - Mars 1971.
- DANCETTE C. : Agroclimatologie appliquée à l'Economie de l'Eau en zone soudano-sahélienne.
ISRA - CNRA - Bambey Avril 1977.
- DANCETTE C. : Détermination au champ de la capacité de rétention après irrigation dans un sol sableux du Sénégal - intérêt agronomique de cette mesure et application à une culture d'arachide.
Agr. Trop. Vol XXV n ° 1 1970.
- DANCETTE C. - MAERTENS C. : Méthode d'estimation de la capacité au champ pour l'eau à partir de pF₃.
Bull. AFFES n ° 3 1974.
- DAVIES D.A. : Une évaluation des ressources du climat et de l'eau pour le développement de l'agriculture dans la zone soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest.
OMM - n ° 459 - 1977.

DEPIERRE - GILLET N. : Désertification de la zone sahélienne
au Tchad (bilan de 10 années de mise en
défens).

Bois et forêts des Tropiques n ° 139
O-N/1973.

DELWAULLE J.C. : Désertification de l'Afrique au Sud du Sahara.
Bois et forêts des Tropiques n ° 149 M-J/1973.

DESJEUNES S. - GRAS R. - OSTY PL. : Drainage ; besoin en eau
d'irrigation, formule de
Turc, végétation permanente.
Programme DITUP-INRA-1965.

DE MIRANDA : Rapport de mission d'études agronomiques sur les
villages témoins : DAN KOULOU, GOURJAE, MAGAMI et
SERKIN HAOUSSA.

Nov. 1977 (Acc Lutte contre la sécheresse).

DIDIER DE ST AMAND R. : Le Continental terminal et son influence
sur la formation des sols au Niger.
ORSTOM Ser. Pédol. Vol VII n ° 41969.

DOJARENKO 1924 : Cité par SOKOLOWSKY 1er Comm. AISS 1933.

DROUHIN M : La sécheresse, drame de l'Afrique sahélienne - Aspects
techniques et remèdes possibles.
Industries et Travaux d'O-M Juillet.
p 576 - 582 - 1973.

DUC TM. : Irrigation de la zone centre Nord du Sénégal - Résul-
tats de Recherches et Perspectives : Comité Consulta-
tif. FAO - AIEA - ISRA - Bambey - DOC AIEA 192 VIENNA
1976.

DUCHAUFOR PH. : Précis de pédologie.
Massom éd. 1970.

EISMA C.J. : Carte pédologique de l'aménagement hydro-agricole
de Lossa INRAN 1979.

ELDIN M. : Nouvelle installation d'enregistrement, précise et
économique de l'évapotranspiration potentielle.
Agro. Trop. n ° 11 Nov. 1968.

- ELDIN M. - DAUDET A. - QUENCEY P. : L'évapotranspiration potentielle - Application - Définition - Principales évaluations - Mesure.
Agro. Trop. XXIV n ° 2 Fév. 1969.
- ELOUARD P. : Eléments pour une définition des principaux niveaux du Quaternaire Sénégal-Mauritanien.
IFAN XXIX n ° 2 1967.
- FEAU CH. : Acc - LOSSA - Etude pédologique des périmètres de LOSSA et SONA.
INRAN-GERDAT - IRAT 1976.
- FEODOROF A. : Etude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante. Cas d'un sol initialement sec et d'un arrosage sans formation de plan d'eau.
- FEODOROF A. : Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau.
Ann. Agr. Vol. 13 n ° 6 1962.
- FEODOROF A. : Capacité de rétention pour l'eau et structure du sol.
Acad des Sc. T 252 n ° 1 1961.
- FEODOROF A. : Influence des propriétés structurales sur la pénétration de l'eau dans un sol sec.
CR Acad Sc. t 47 1961.
- FEODOROF A. - BALLUF J-L. : La tension de l'eau à la capacité de rétention.
Note provisoire 1968.
- FIES - HENIN - MONNIER : An Agro. T 23 1972.
- FOREST : Bilan hydrique efficace et prospective décadaire des besoins en eau des cultures pluviales en zone soudano-sahélienne.
Cahier pédagogique - Min - Coop - 1974.
Cahier opérationnel Tillabéry - Min - Coop - 1974
Le bilan hydrique efficace décadaire des cultures pluviales en zone soudano-sahélienne.
CIEH Nov. 1974.

- FOREST - POULAIN J-F. : Etude du ruissellement et de ses conséquences au niveau du bilan hydrique des cultures pluviales.
Miméo CIEH IRAT janv. 1978.
- FRANQUIN P. : Analyses agroclimatiques en régions tropicales - saison pluvieuse et saison humide. Application.
ORSTOM Sc. Biologie n ° 9 Juillet 1969.
- GAVAUD M. : Les grands traits de la pédogénèse au Niger méridional. ORSTOM n ° 76 1977.
- GAVAUD M. : Les sols bien drainés sur matériau sableux du Niger - Cahier ORSTOM ser. Pédo. Vol VI n ° 3-4 - 1960.
- GILLET N. : Les problèmes de l'utilisation de l'eau.
Agro Trop. Vol XXV n ° 10-11 déc. 1970.
- GRAS R. : La détermination expérimentale de diverses catégories de porosité.
C.R. Acad. Sc. t 260 8 Fév. 1965.
- GREEN AMPT. : Ag Sc Vol 4-5 1911-1912.
- GREIGERT et POUGNET : Notice explicative sur la carte géologique de la République du Niger (1/2.000.000).
BRGM 1967.
- GUILLOBEZ : Les milieux vertiques du bassin de la Volta blanche dans la région du Bagre (Haute-Volta).
Agron. Tropicale n ° 1 - 1979.
- HALLAIRE - HENIN : Cr. Ac. Sc. Vol 246 A et B 1958.
- HANSSEN V. : Potential evapotranspiration, a comparaison between results obtained from a weighing lysimeter with estimates based on Penman's equations.
Agric. Univ. of Norway Report n ° 38.
March 1975.
- HENIN S. : Cours de Physique du sol.
Vol I et II.
ORSTOM n ° 28 1976.
- HENIN S. - GRAS R. - MONNIER G. : Le profil cultural Masson 1969.

HENIN S. - MONNIER : C.R. Ac. Sc. Vol 252 1961.

HILLEL D. : L'eau et le sol - Principes et processus physiques.
VANDER 1974.

HUMBEL F-X : Etude de la macroporosité des sols par des tests de perméabilité : application d'un model de filtration aux sols ferrallitiques du Cameroun.
ORSTOM Sér. Pédol. Vol XIII n ° 2 1975.

HUMBEL F-X : La compacité de sols ferrallitiques du Cameroun ; une zonalité dans ce milieu en relation avec la dessiccation saisonnière.
ORSTOM Sér. Pédol. Vol XII n ° 1 1974.

HURAUULT J. : L'érodibilité des sols surpâturés des hauts plateaux de l'Adamawa (Cameroun). Essai de caractérisation par des mesures d'infiltration.
Bull. AFES n ° 1 Janv. - Fév. 1971.

IRAT/NIGER : La sécheresse dans le sahel. Cas du Niger 1974.

IRAT/NIGER : Expérimentation de la canne à sucre au Niger.
Campagne 1971-1972 - Etude sur l'irrigation par aspersion dans le périmètre de Tillabéry.

- rapport et annexe - Nov. 1972
- note de synthèse - Nov. 1972
- rapport complémentaire - avril 1973

IRAT/NOGENT : Note sur l'installation d'un lysimètre de type ROOSE
Miméo IRAT.

IRAT :- Informations n ° 10 1978.

Les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche.
Leur prise en masse à la dessiccation, obstacle aux travaux de labour.

KALMS J-M. - VALET S. : Détermination des besoins en eau de différentes cultures vivrières et industrielles dans les conditions pédo-climatiques des terrasses du Niger à Tillabéry.
INRAN Juillet 1975.

KALOGA B. : Etude pédologique des bassins versants des voltas
Blanche et Rouge en Haute-Volta.
ORSTOM VOL IV n ° 1 1966.

KIJNE J.W. - BARQS C. : Methods of calculating potential evapo-
ration Landbouwh ogeschool 1971.

KILIAN C. : Des principaux complexes continentaux du Sahara.
CR Soc. Geol. Fr p 109. 1931.

KILIAN J. : Etudes morphopédologiques dans la zone de la BOUGOU_
RIDA (Haute-Volta).
IRAT - 21 Février - 1e Mars 1976.

KILIAN J. : Etude du milieu physique en vue de son aménagement -
Conceptions de travail. Méthodes cartographiques.
Agro. Trop. n ° 2-3 - Février 1974.

KOWAL J. : Radiation and potential crop production at SAMARU, NI-
GERIA, SAVANNA. Vol 1 n ° 1 Juin 1972.

KOWAL J. and KNABE T. : An agroclimatological atlas of the nor-
thern states of Nigeria. Alunedo Bello.
University - Press. SAMARU - ZAIRE -
NIGERIA 1972.

KVASNIVOFF. : Techn. Comm. Sov. Scet. AISS 1927.

LETEY J. - HSIA E. - PELISHEK R.C. and OSBORU J. :
Infiltration measurement with the neutron moisture probe.
Soil Sc. Vol 91 n ° 2 Feb. 1961.

LECOSTE E. : Calcul graphique de l'évapotranspiration potentielle
selon les formules de R.J. BOUCHET, TURC.
INRA Ann. Agron. Vol 14 n ° 4 1963.

LOBERT A. - DAUTY J. : Détermination des lois de probabilité des
intensités et des durées des épisodes plu-
viaux, des sécheresses et des gelées.
BTI 238 1969.

(1) MACHENS E. - Notice explicative.
Carte géologique du N Océ (1/200.000)
BRGM 1967.

- MAINGUET et alt. : Compte rendu de la seconde mission de reconnaissance morphodynamique de l'Unité Expérimentale de SERKIN HAOUSSA - ACC Lutte contre les effets de l'aridité.
DGRST - GERDAT - Univ. REIMS 1977.
- MARCESSE J. : Prospection hydropédologique d'un périmètre d'aménagement hydro-agricole.
CEA - 1974.
- MARCESSE J. : Détermination in situ de la capacité de rétention d'un sol au moyen de l'humidimètre à neutrons.
CEA - AIEA Kenna 1967.
- MARCESSE J. - COUCHAT PH. : Etude hydrodynamique des sols à l'aide d'un humidimètre à neutrons automatique.
AIEA Vienna 1971.
- MARTY J-R et COURAU M. : Influence du système de culture sur l'écoulement de l'eau dans un sol mal structuré.
- MARTY J-R : Les méthodes de mesure du bilan de l'eau en agriculture. St. Agro INRA - Toulouse.
- Mc CULLOCH JSG : Tables for the rapid computation of the Penman estimate of evaporation.
E. Afr. Agric. for Jor - 30/1965.
- MICHEL P. (2) : Les grandes étapes de la morphogénèse dans les bassins des fleuves Sénégal et Gambie pendant le quaternaire.
Congrès Panafric. de Préhistoire Dakar Déc. 1967.
- MICHEL P. : Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie - Etude géomorphologique.
2 tomes ORSTOM n ° 63-1973.
- MICHEL P. - P. ELOUARD et H. FAURE : Nouvelles recherches sur le quaternaire récent de la région de St. Louis (Sénégal)
IFAN - T XXX - Série A, n ° 1
Janvier 1968.

MONNIER Q. : Communication orale - 1973.

NICOU A. : Contribution à l'étude et à l'amélioration de la porosité des sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche.
Agro. Trop. XXIX n ° 11 Nov. 1974.

NICOU A. - CHOPPART J-C : Les techniques d'économie de l'eau dans les sols sableux du Sénégal.

NOUDEU J. : Note technique sur le climat de Maradi, ses variations ses conséquences - Projet de développement rural - Niger 1977.

OMM : Une évaluation des ressources du climat et de l'eau pour le développement de l'agriculture dans la zone soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest.
Rapport n ° 9 - OMM 459 1977.

ORLOB G-T and RADHAKRISHNA G-M : The effects of Entrapped gases on the hydraulic characteristics of porous media.
Trans. An. Geophysical Union, 39, 1958.

OUEDRAGO J-P : Note préliminaire concernant l'évapotranspiration potentielle en Haute-Volta et son calcul par la méthode du bilan d'énergie de PENMAN.
OMM - PNUD Sept. 1976.

ORSTOM : Monographie hydrologique du bassin du Niger.
3ème partie le Niger-Moyen.
Mai 1970.

ORSTOM : Etude pédologique du Niger Occidental, Central et Oriental.
Rapports ORSTOM n ° 6500/200 Déc. 1964.

PEERKLAND P-K and BOEKEL P. : Moisture retention by soils.
Vorol. Meded. Comm. Hydrol. Onderz n ° 5

PENMAN H-L : Evaporation : An introduction Sarivey
Neith J. Agric. Sc 1956.

PEGUY Ch. : Précis de climatologie.
Masson 1961.

PICHOT J. - BURDIN S. - CHAROY J. - NABOS J. : L'enfouissement des pailles de mil pennisetum dans les sols sableux dunaires. Agro. Trop. Vol XXIX n ° 10 Oct. 1974.

PIRARD F. : Géomorphologie du Manga Nigérien - Schéma d'évolution du quaternaire du Secteur nord occidental de la cuvette du Tchad.
IFAN XXVIII, Série A, n ° 1, Janvier 1966.

PERIGAUD S. : Contribution à la mise en valeur de la Breme These 1968.

POURRUT P. - ZEBROWSKY C. : Détermination de certaines caractéristiques intrinsèques et hydrodynamiques des sols par utilisation de méthodes neutroniques.
ORSTOM - Tanarive - Janvier 1970.

PRUVOST : Cours de géologie - 1958.

RIJKS D. : Les besoins en eau des cultures (compte-rendu des travaux réalisés à GUEDE et à KAEDI.
OMVS - FAO - PNUD Juillet 1974.

RODIER : Evaluation de l'écoulement annuel dans le sahel tropical africain.
ORSTOM n ° 46 1975.

ROOSE E-J : Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest (20 années de mesures en petites parcelles expérimentales).
ORSTOM - ABIDJAN Août 1975.

RIOU Ch. : Calcul de l'évaporation par la méthode du bilan énergétique en zone sahélienne.
ORSTOM Ser. Hydrol. Vol IV n ° 2 1967.

RIOU Ch. - DUBOIS G. : L'utilisation des bacs d'évaporation sous climat sahélien.
ORSTOM Ser. Hydrol. n ° 5, Déc. 1966.

TALINEAU : Remarque sur quelques méthodes de détermination de la filtration de l'eau dans un sol.
Agro. Trop. Vol XXIV n ° 12 1969.

TURC : Evaluation des besoins en eau d'irrigation - Evapotranspiration potentielle.

Ann. Agro. Vol XII n ° 1 1961.

A propos d'indices climatiques - Mélanges offerts par ses amis et disciples à M. PADE OPHRYS 1968.

SCHOCK P-G. : Evaporation potentielle et formule du "Piche corrigé". Bioclimatologie INRA Montfavet Déc. 1967.

SECK M. : Etude des principaux facteurs agrométéorologiques au Sénégal.

Agro. Trop. Vol XXV n ° 3, Mars 1970.

SIRCOULON J. : Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses 1913 et 1940.

ORSTOM Sér. Hydrol. Vol X II n ° 2 1972.

SOGETHA : Les terrasses du Niger à Tillabéry - Etude des possibilités de culture de la canne à sucre.

n ° 8003 - Déc. 1969.

VACHAUD G. : Vérification de la loi de Darcy généralisée et détermination de la conductivité capillaire à partir d'une infiltration horizontale. Labo de Mecan des Fluides Grenoble.

VALET S. : Rapports annuels synthèses.

Miméo IRAT. 1972-1975.

Miméo INRAN. 1976-1978.

VALET S. - DEMEY G. - IROO : Etude des déficits d'alimentation hydrique du riz pluvial dans la région de GAYA (Sud-Niger).

(Conséquence sur la possibilité de réussite de cette culture).

IRAN - Mai 1978.

VALET-FEAU : Cartes d'aptitude à l'irrigation des unités morphopédologiques des terrasses du Niger à LOSSA et SONA - Synthèse. DGRST - GERDAT 1977.

VALET S. - MARCESSE J. : Prospection hydropédologique, amélioration foncière et essais d'irrigation sous cultures, en vue de l'aménagement des terrasses du fleuve Niger à Tillabéry.

Agro. Trop. XXXV n ° 2 Avril-Juin 1980.

- VALET S. : Essai de détermination de la réserve en eau facilement utilisable (R.F.U.) de sols sableux par des cultures vivrières - Périmètre de SONA.
INRAN-GERDAT-1978.
- VALET S. : Etude de l'évolution de la prise en masse des sols d'une toposéquence à Tillabéry.
INRAN Janv. 1980.
- VALET S. : Résultat de l'effet de sous-solage sur plusieurs types de sols compacts des terrasses du fleuve Niger à Tillabéry et à Tilla Keina et ses conséquences sur l'enracinement et le rendement de la canne à sucre.
INRAN Déc. 1976.
- VALET - ALBERT Cl. : Etude des relations Eau-Sol-Plante dans les conditions pédologiques de Tillabéry.
ACC LOSSA - Mars 1976.
- VALET S. : Essai de détermination des déficits relatifs d'alimentation maximum en eau du mil à Tillabéry et à Maradi.
ACC LOSSA-MAYAHY.
Miméo - GERDAT - INRAN Avril 1978.
- VALET S. : Utilisation de technique nucléaire pour le contrôle "in situ" de l'amélioration physique et hydraulique apportée par le sous-solage aux sols des terrasses du Niger.
IRAT 21 Nov. 1978.
- VALET S. : Prospection hydropédologique des principaux sols des terrasses du Niger à Tillabéry.
Campagne 1971-72.
1972-73.
1973-74.
- VALET S. : Prospection pédo-hydrologique des sols des terrasses du Niger en vue d'aménagements hydro-agricoles à LOSSA et SONA.
Acc. LOSSA DGRST n ° 76.7 , 0835.
INRAN-IRAT - Déc. 1976.
- VALET S. : Seconde prospection hydro-pédologique des sols des terrasses du Niger à SONA.
ACC LOSSA - DGRST n ° 76.7.0835.
- Rapport INRAN-IRAT Déc. 1977.
- Rapport complémentaire INRAN-IRAT-1979.

VALET S. : Résultat des essais de rationnement en eau de culture de tomate, gombo et blé sur les sols compacts de LOSSA. Acc GERDAT - INRAN - 1980.

VALET S. - MICHAUX F. : Résultat des essais d'irrigation de complément sur sorgho, arachide et coton sur le périmètre irrigué de LOSSA.
ACC. GERDAT - INRAN 1979.

VEIHNEYER F-J and HENDRICKSON A-W : Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils.
Soil Sc. 68, 75-94, 1949.

VIZIER J-F : Contribution à l'étude des phénomènes d'hydromorphie
Recherche de relations morphogénétiques existant dans un type de séquence de sols hydromorphes peu humifères du Tchad. 1-2-3e parties.
ORSTOM Ser. Pedol. Vol XII 2/3/4 1974.

VIGNERON J. - DESAUNETTES J-R : Etablissement d'un indice de compacité.
Bull. de l'A.F.E.S. Avril 58 - n ° 4

VOGT J. : Etude de l'alluvionnement en Haute-Volta.
Rapport BRGM - 1969.

WILLAIN P. - OSMAN A. - GRAS F. : Etude comparée des propriétés hydriques et des caractéristiques hydrodynamiques de trois familles de sols du Liban Nord.
Magon Série Tech. n ° 14 - Juin 1971.

WRIGHT P-B : Pouvait-on prévoir la sécheresse en Afrique ?
La recherche Vol 5 n ° 44 Avril 1974.